



Universidad
Carlos III de Madrid

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR. DEPARTAMENTO MECÁNICA.

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PROCESO DE LAMINACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Tutor: Miguel Marco Esteban

Co-director: Carlos Edgar Moreno Sánchez

Autor: Francisco Javier Abellán Cabrera

Leganés, año 2014

AGRADECIMIENTOS.

Me gustaría dar las gracias a todas aquellas personas de mi entorno que han hecho posible que llegue hasta aquí, sin ellas no hubiera sido posible. Para lograr tus objetivos, es tan importante el trabajo como desconectar de él.

A mis compañeros de clase, ellos saben bien el esfuerzo que conlleva completar este ciclo y lo corto que ha parecido gracias a su compañía.

Y por último, a mis tutores Miguel Marco y Carlos Moreno, gracias por darme la oportunidad de trabajar con vosotros y por sacar siempre tiempo de donde no lo hay para ayudarme.

Gracias.

RESUMEN

En el presente documento se realiza un análisis numérico del comportamiento mecánico de un material sometido a un proceso de laminación plana en frío. Procesos de este tipo son cada vez más empleados, hasta el punto que una parte muy importante de la producción metálica industrial está compuesta por la producción de láminas y chapas metálicas obtenidas por laminación en frío. Este hecho es debido al bajo coste del mismo y a la gran variedad de productos fabricados a partir de estas chapas y láminas metálicas. Muy atractivos por su buena resistencia mecánica y su excelente relación resistencia - peso, son fabricados mediante este proceso desde productos de la vida cotidiana, como latas de conserva o de bebida, hasta productos más sofisticados como pueden ser la carrocería de un automóvil o el fuselaje de una aeronave.

Trabajos de investigación sobre el proceso de laminación plana, han demostrado la existencia de dos patrones bien diferenciados en las distribuciones de presión en el contacto lámina – rodillo, dependiendo del grado de homogeneidad de la deformación inducida en el material (H). Para deformaciones homogéneas ($H > 3$) el patrón mencionado únicamente presenta un máximo, mientras que para deformaciones no homogéneas ($H < 3$) el patrón presenta dos máximos. Sin embargo dichos trabajos de investigación han demostrado que a medida que se reduce el valor de H , el patrón tiende a cambiar de la configuración de dos máximos a la de uno. Este comportamiento puede justificarse debido al hecho de que al disminuir H aparecen tensiones residuales en la superficie del material cada vez más elevadas.

Por tanto el objetivo del presente documento es el encontrar el valor de H en el que se produce el cambio de patrón en deformaciones no homogéneas. Para ello se ha desarrollado un modelo numérico de elementos finitos mediante el software comercial Abaqus que permita realizar simulaciones del proceso de laminación, con el que poder estudiar la evolución de las tensiones residuales en el material para diferentes valores del parámetro H .

El material a laminar escogido ha sido una aleación de aluminio – manganeso de extendido uso industrial como es la AA 3004 H-19. La adición de manganeso como aleante al aluminio, hace que se aumente la resistencia mecánica pero manteniendo la buena resistencia a la corrosión y maquinabilidad del aluminio. Razones por las cuales, resulta una elección idónea como material escogido para la fabricación de latas de conservación de productos alimenticios y bebidas.

El modelo numérico desarrollado ha sufrido un procedimiento de validación en términos de la fuerza de laminación y del par generado, mediante la comparación de los resultados obtenido con datos recogidos de artículos publicados en la literatura científica.

Finalmente se realizan modificaciones al modelo desarrollado para analizar la influencia de dichos cambios en los resultados obtenidos.

ABSTRACT

The present document carries out a numerical analysis of the mechanical performance of a material subjected to flat cold lamination. These type of processes are more and more employed, up to the point that a very important fraction of the mechanical industrial production is compound by metallic sheets production which are obtained by cold lamination. This happens because of the low cost of cold lamination and the wide range of products that are manufactured from these metallic sheets. Among others, products that go from daily life items, such as tinned food or beverage cans, to more sophisticated goods, like bodyworks or aircraft's fuselages, are manufactured by this procedure, and they are very attractive because of their good mechanical resistance and their excellent strength to weight ratio.

Research works about cold flat lamination have demonstrate the existence of two well distinguished patterns on stream roller - sheet contact pressure distribution, depending on the homogeneity factor of the induced deformation on the material (H). For homogeneous deformations ($H > 3$) the aforementioned pattern only presents a maximum, whereas for non homogeneous deformations ($H < 3$) two maximums are presented. Nevertheless those previously mentioned research works have shown that, while H value is lessen, the pattern tends to change from two maximums configuration (o from a configuration of two maximums) to one. This behaviour can be justified due to the fact that when H diminished, increasingly higher residual tensions appears on the material surface.

Therefore, the aim of the present document is to find H 's value in wich the change of the pattern on non homogeneous deformations is produced. To this end a numerical finite-element model has been developed with the comercial software Abaqus. A numerical model that allows to perform simulations of the lamination process with which we have been able to study the evolution of those residual tensions in the material for the different values of the parameter H .

The material that has been chosen to be laminated has been an alloy of aluminium - manganese of widespread industrial use like is the AA 3004 H-19. The manganese addition as an aluminum alloy, increase the mechanic resistance while it maintains the good resistance to corrosion and the machinability of the aluminium. For those reasons, it happens to be a suitable choice for the manufacturing of food and beverage cans.

By the comparison of the robtained results with data collected from articles that have been published on scientific literature the numerical model has suffered a validation procedure, in terms of the lamination strength and the torque generated.

Finally some modifications are done to the developed model in order to analyze the influence of those changes in the obtained results.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 MOTIVACIÓN.....	13
1.2 OBJETIVOS.....	14
1.3 METODOLOGÍA.....	15
1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.....	16
2. ANTECEDENTES.....	17
2.1 EL ALUMINIO.....	18
2.1.1 INTRODUCCIÓN.....	18
2.1.2 CARACTERÍSTICAS.....	19
2.1.3 ALEACIONES DE ALUMINIO (AA).....	22
2.1.4 APLICACIONES PRINCIPALES.....	27
2.2 PROCESO DE CONFORMADO POR LAMINACIÓN.....	29
2.2.1 INTRODUCCIÓN.....	29
2.2.2 LAMINADO PLANO.....	31
2.2.3 LAMINACIÓN DE PERFILES.....	35
2.2.4 MOLINOS LAMINADORES.....	36
2.3 ENSAYOS DE LA LITERATURA.....	38
2.3.1 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA LAMINACIÓN PLANA EN FRÍO DEL ALUMINIO AA 3004.....	39
3. ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PROCESO DE LAMINACIÓN.....	41
3.1 INTRODUCCIÓN.....	42
3.2 DEFINICIÓN DEL MODELO.....	42

3.3 DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES.	48
3.4 ALTERNATIVAS AL MODELO PRINCIPAL.....	52
3.4.1 RODILLO TIPO WIRE.....	52
3.4.2 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA.	54
3.4.3 CAMBIO EN LA ELECCIÓN DEL MATERIAL SOMETIDO AL PROCESO DE LAMINACIÓN.	58
3.5 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.	59
4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.	66
4.1 ANÁLISIS DEL MODELO PRINCIPAL.....	67
4.2 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL RODILLO TIPO WIRE.	70
4.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN TÉRMICA. INFLUENCIA DE LA DEFINICIÓN DEL MATERIAL LAMINADO MEDIANTE LA ECUACIÓN CONSTITUTIVA DE JOHNSON - COOK.	72
4.4 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO DE MATERIAL.	74
5. MARCO REGULADOR.....	78
5.1 NORMAS ISO.....	79
5.2 NORMAS OHSAS.	80
6. PRESUPUESTO DEL ANÁLISIS NUMÉRICO.	82
6.1 PRESUPUESTO.....	83
7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	86
7.1 CONCLUSIONES.....	87
7.2 TRABAJOS FUTUROS.	88
8. BIBLIOGRAFÍA.	90

ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 2.1.4. 1 – Aluminium Forest (Utrecht, Holanda) [2].

Figura 2.1.4. 2 – Imagen de cable desnudo de cobre (parte superior de la figura) y de aluminio (parte inferior de la figura).

Figura 2.2.1. 1 – Productos obtenidos mediante procesos de laminación.

Figura 2.2.1. 2 – Proceso de laminación [3].

Figura 2.2.2. 1 – Vista lateral del laminado plano [3].

Figura 2.2.2. 2 – Variación de la presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano [3].

Figura 2.2.4. 1 – Molino de laminación de dos rodillos [3].

Figura 2.2.4.2 – Molino de laminación de tres rodillos [3].

Figura 2.2.4. 3 – Molino de laminación de cuatro rodillos [3].

Figura 2.2.4. 4 – Molino en conjunto o racimo [3].

Figura 2.2.4. 5 – Molino de rodillos en tándem o tren de laminación [3].

Figura 3.2. 1 – Dimensiones del rodillo.

Figura 3.2.2 – Dimensiones de la lámina.

Figura 3.2. 3 – Imagen del conjunto lámina – rodillo para una reducción del 40 %.

Figura 3.2. 4 – Detalle de la partición realizada al rodillo en el modelo numérico.

Figura 3.2.5 – Detalle del mallado final del rodillo.

Figura 3.2. 6 – Detalle del mallado final de la lámina.

Figura 3.4.1 . 1 – Imagen de rodillo tipo wire.

Figura 3.4.1. 2 – Detalle mallado final para el modelo con rodillo tipo wire.

Figura 3.4.2. 1 – Distribución geométrica de los valores de la variable temperatura en el instante inicial, para una reducción de espesor del 40 %.

Figura 3.4.2. 2 – Distribución geométrica de los valores de la variable temperatura cuando se está produciendo la deformación, para una reducción de espesor del 40 %.

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 2.1.2. 1 – Propiedades atómicas del aluminio [1].

Tabla 2.1.2. 2 – Propiedades físicas del aluminio [1].

Tabla 2.1.2. 3 – Propiedades eléctricas del aluminio [1].

Tabla 2.1.2. 4 – Propiedades térmicas del aluminio [1].

Tabla 2.1.2 . 5 – Propiedades mecánicas del aluminio [1].

Tabla 2.1.3. 1 – Codificación aluminos laminados según normativa H35.1 del ANSI.

Tabla 2.1.3. 2 – Codificación fundiciones de aluminio según normativa B275 del ANSI.

Tabla 2.1.3. 3 – Clasificación de las aleaciones de aluminio según su estado.

Tabla 3.2. 1 – Resultado obtenido para una reducción de espesor del 40 % en [4] y resultado admisible en este trabajo.

Tabla 3.3. 1 –Constantes elásticas para el AA 3004 – H19 [4].

Tabla 3.3. 2 – Constantes plásticas para el AA 3004 – H19 [4].

Tabla 3.3. 3 – Propiedades térmicas para el AA 3004 H-19 [4].

Tabla 3.3. 4 – Propiedades mecánicas y térmicas para el acero [4].

Tabla 3.4.2. 1 – Constantes ecuación Johnson – Cook para el AA 3004 H-19 [7].

Tabla 3.4.3. 1 – Constantes elásticas para el AA 2024 T-351 [9].

Tabla 3.4.3. 2 – Propiedades térmicas para el AA 2024 T-351 [9].

Tabla 3.4.3. 3 – Constantes ecuación Johnson – Cook para el AA 2024 T-351 [9].

Tabla 3.5. 1 – Fuerza de laminación obtenida y presentada en la literatura [4].

Tabla 3.5.2 – Par de laminación obtenida y presentada en la literatura [4].

Tabla 6.1. 1 – Costes de personal.

Tabla 6.1. 2 – Coste de equipos.

Tabla 6.1. 3 – Desglose coste de licencia Abaqus.

Tabla 6.1. 4 – Costes Totales.

ÍNDICE DE GRÁFICAS.

Gráfica 3.2. 1 – Resultados del análisis de sensibilidad del mallado de la lámina.

Gráfica 3.3. 1 – Curvas tensión – deformación para el AA 3004 H-19.

Gráfica 3.3. 2 – Detalle régimen plástico en las curvas tensión – deformación para el AA 3004 H-19.

Gráfica 3.5. 1 – Comparativa entre fuerza de laminación obtenida y presentada en la literatura [4].

Gráfica 3.5. 2 – Fuerza de laminación obtenida en el modelo desarrollado, en el modelo presentado en [4] y estimada analíticamente.

Gráfica 3.5. 3 – Comparativa entre par de laminación obtenido y presentado en la literatura [4].

Gráfica 4.1. 1 – Valores en la superficie de las tensiones residuales normales en dirección de laminación, en función del parámetro H.

Gráfica 4.1. 2 – Valores en la superficie de las tensiones residuales normales en la dirección de laminación, en función del parámetro H [4].

Gráfica 4.1. 3 – Evolución de la presión en el contacto rodillo–material para reducciones del 30 y el 20 % [4].

Gráfica 4.2. 1 - Comparativa entre fuerzas de laminación obtenidas mediante el modelo desarrollado y las obtenidas mediante la alternativa del modelo con el rodillo tipo wire.

Gráfica 4.3. 1 – Valores en la superficie de las tensiones residuales normales en dirección de laminación, en función del parámetro H. Para el modelo desarrollado incluyendo la influencia de la variación térmica.

Gráfica 4.3. 2 - Comparativa entre fuerzas de laminación obtenidas mediante el modelo desarrollado, el modelo incluyendo la influencia de la variación térmica y los resultados presentados en [4].

Gráfica 4.4. 1 - Comparativa entre fuerzas de laminación obtenidas mediante el modelo presentado en [4] y las obtenidas mediante la alternativa del modelo con el material AA 2024 T-351.

Gráfica 4.4.2 - Valores en la superficie de las tensiones residuales normales en la dirección de laminación, en función del parámetro H, para el proceso de laminado del AA 2024 T-351.

ÍNDICE DE ECUACIONES.

Ecuación 2.2.2. 1 – Expresión para el cálculo del parámetro draft en el proceso de laminado plano.

Ecuación 2.2.2. 2 – Expresión para el cálculo de la reducción llevada a cabo durante un proceso de laminado plano.

Ecuación 2.2.2. 3 – Principio de conservación del material en el proceso de laminado plano, en términos de volumen.

Ecuación 2.2.2. 4 – Principio de conservación del material en el proceso de laminado plano, en términos de la velocidad volumétrica.

Ecuación 2.2.2. 5 – Expresión para el cálculo del parámetro deslizamiento hacia delante.

Ecuación 2.2.2. 6 – Expresión para el cálculo del máximo valor que puede tomar el parámetro draft durante el proceso de laminado plano.

Ecuación 2.2.2. 7 – Expresión para el cálculo de la fuerza de laminación en el proceso de laminado plano.

Ecuación 2.3.1. 1 – Expresión para el cálculo del grado de homogeneidad de la deformación (H).

Ecuación 2.3.1. 2 – Expresión para el cálculo de la reducción de espesor llevada a cabo durante el proceso de laminado plano.

Ecuación 3.2. 1 – Expresión de la relación existente entre la velocidad lineal y la velocidad angular.

Ecuación 3.3. 1 – Ecuación de la curva de fluencia de los materiales.

Ecuación 3.4.2. 1 – Ecuación constitutiva de Johnson – Cook.

Ecuación 3.4.2. 2 – Expresión del término T_H de la ecuación constitutiva de Johnson – Cook.

Ecuación 3.4.2. 3 – Ecuación constitutiva de Johnson – Cook para el AA 3004 H-19.

Ecuación 3.4.3. 1 – Ecuación constitutiva de Johnson – Cook para el AA 2024 T-351.

Ecuación 3.5. 1 – Aproximación de la expresión para el cálculo de la fuerza de laminación en el proceso de laminado plano.

Ecuación 3.5. 2 – Expresión para el cálculo del esfuerzo de fluencia promedio en el proceso de laminado plano.

Ecuación 3.5. 3 – Expresión para el cálculo de la longitud de contacto rodillo – lámina en el proceso de laminado plano.

Ecuación 3.5. 4 – Expresión para el cálculo del esfuerzo real experimentado en el proceso de laminado plano.

Ecuación 3.5. 5 – Expresión para el cálculo del par de laminación generado durante el proceso de laminado plano.

Ecuación 3.6. 1 – Expresión para el cálculo del coste de amortización del equipo empleado.

Capítulo 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 MOTIVACIÓN.

Pese al conocimiento de las propiedades del aluminio tiempo atrás y a la abundancia de este en la corteza terrestre, su utilización industrial se demora únicamente hasta el pasado siglo, debido a que históricamente la extracción de aluminio ha sido considerada una tarea muy ardua. Fue en el siglo XIX, gracias a distintos avances tecnológicos en su extracción y a su excelente combinación de propiedades, cuando se reparó en él. Su ligereza, bajo punto de fusión, excelente maleabilidad y conductividad, tanto eléctrica como térmica, además de su capacidad de aleación con otros materiales con el objetivo de mejorar sus propiedades, dotan al aluminio de una versatilidad de uso que le han hecho posicionarse entre los materiales más importantes del planeta en el ámbito industrial, sólo superado por el acero.

El uso del aluminio y sus aleaciones está extendido en la industria automovilística, aeronáutica e incluso en fabricación de productos utilizados en la vida cotidiana. Una de las aleaciones más conocidas en el ámbito industrial es la AA 3004 H-19, se trata de una aleación de aluminio y mayoritariamente manganeso, lo que confiere al aluminio una mejora de su resistencia a tracción y un buen comportamiento frente al mecanizado, lo que la hace idónea para la fabricación de equipo médico, calderería, muebles o el cuerpo de las latas de conserva, su uso más conocido.

No obstante y pese a la masificación de su uso, la extracción de aluminio no resulta rentable económicamente y medioambientalmente, puesto que en el proceso de recuperación del aluminio por medio de la chatarra, el gasto energético es un 95% inferior respecto de su obtención por extracción.

En el proceso de reciclaje de aluminio son de vital importancia los procesos de conformado por deformación plástica para obtener el nuevo producto requerido. Entre este tipo de proceso industrial destaca el proceso de laminación. El cual consiste en el paso de un tocho de material a través de unos rodillos produciendo material alargado de sección transversal constante, sin pérdida de material durante el proceso.

Debido a los hechos expuestos, ha tomado gran importancia la necesidad de conocer cómo se comportan el aluminio y sus aleaciones ante procesos de conformado por deformación plástica, como el de laminación. Es necesario conocer la influencia que tienen las distintas variables presentes en un proceso de laminación sobre el material obtenido para poder optimizar dicho proceso.

Por todo ello, junto a la dificultad de encontrar en la literatura disponible en la actualidad modelos numéricos desarrollados en Abaqus, con los que obtener resultados fiables y precisos sobre el proceso de laminación de la aleación AA 3004 H-19, se decide realizar este trabajo de fin de grado.

1.2 OBJETIVOS.

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es desarrollar un modelo numérico capaz de simular el proceso de laminación sobre una aleación de aluminio. Para ello se ha empleado el software comercial de análisis mediante elementos finitos Abaqus. Para la validación del modelo desarrollado se han empleado resultados obtenidos por otros modelos numéricos disponibles en la literatura científica.

El material escogido para laminar ha sido una aleación de aluminio-manganeso, AA 3004 H-19, de extendido uso industrial para la fabricación de los cuerpos de las latas de conserva o equipo médico, entre otros productos.

Una vez haya quedado validado el modelo se procede a realizar distintas modificaciones en la definición del mismo, con el fin de analizar la respuesta del modelo ante cada una de estas modificaciones.

Para la consecución de los objetivos propuestos, es necesario completar satisfactoriamente los objetivos parciales presentados a continuación:

- Creación de un modelo numérico de simulación del proceso de laminación sobre la aleación de aluminio anteriormente mencionada, empleando el software comercial de análisis mediante elementos finitos Abaqus.
- Validación del modelo empleando resultados obtenidos por modelos ya validados encontrados en la literatura científica. Análisis de la evolución de los valores en la superficie de las tensiones residuales encontradas en el material una vez sometido al proceso de laminación.
- Modificación de distintos aspectos en la definición del modelo para realizar nuevas simulaciones, de manera que se pueda obtener una comparativa entre los resultados obtenidos en los modelos propuestos.

1.3 METODOLOGÍA.

La consecución de los resultados anteriormente descritos ha precisado de la realización de una serie de actividades recogidas en la metodología aquí presentada:

- Creación de un modelo que reproduzca la laminación de una placa de AA 3004 H-19 empleando el software de análisis mediante elementos finitos Abaqus.
- Búsqueda en la literatura científica de resultados obtenidos mediante simulaciones del proceso de laminación llevadas a cabo por modelos ya validados, para su posterior reproducción empleando el modelo desarrollado.
- Análisis de la fuerza de laminación ejercida por los rodillos para obtener la reducción de espesor requerida, así como, el par generado. Posteriormente se procede a la comparación de los valores obtenidos, con los resultados encontrados en la literatura.
- Validación del modelo desarrollado en términos de fuerza de laminación y par generado mediante su comparación con los resultados hallados en la literatura científica. Se realizan simulaciones con diferentes porcentajes de reducción de espesor.
- Empleo del modelo validado para analizar la evolución de los valores de las tensiones residuales generadas sobre el material por el paso del rodillo sobre su superficie.
- Modificación del modelo desarrollado con el propósito de obtener una relación entre las modificaciones llevadas a cabo y los resultados obtenidos.

1.4 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO.

El presente Trabajo de Fin de Grado se estructura en 7 capítulos más la bibliografía utilizada para su elaboración, a modo de apoyo para el lector se presenta una breve descripción de cada uno de ellos.

- El presente capítulo, *Capítulo 1*, es la introducción donde se presenta el documento.
- En el *Capítulo 2* se presenta la información recogida de la literatura científica para la elaboración del trabajo. Un abanico de información que abarca desde el aluminio en general, y su aleación escogida para realizar el estudio, hasta la teoría del proceso de laminación y del comportamiento del material durante este.
- En el *Capítulo 3* se expone como se ha elaborado el modelo numérico empleando el software comercial de elementos finitos Abaqus y los cambios realizados sobre el modelo principal para la elaboración de distintas alternativas a este. Finalmente se recoge la validación del modelo mediante la comparación con resultados de otros modelos encontrados en la literatura.
- En el *Capítulo 4* se realiza el análisis de los resultados obtenidos por el modelo elaborado y la comparativa con los resultados obtenidos por los modelos alternativos expuestos en el capítulo anterior.
- En el *Capítulo 5* se presentan la regulación, normativas técnicas y restricciones que son de necesario cumplimiento a la hora de realizar un proceso de laminación.
- El *Capítulo 6* presenta un presupuesto detallado del Trabajo de Fin de Grado expuesto.
- En el *Capítulo 7* se presentan las principales conclusiones sobre los estudios realizados y se proponen posibles trabajos futuros sobre este mismo tema.

Capítulo 2

2. ANTECEDENTES

En los apartados siguientes se va a realizar una exposición de las características y propiedades del aluminio y sus aleaciones, material que va a ser objeto de estudio en este trabajo de fin de grado. También se expondrá la fundamentación teórica del proceso de conformado llevado a estudio mediante el modelo numérico desarrollado.

2.1 EL ALUMINIO.

2.1.1 INTRODUCCIÓN.

El Aluminio es uno de los elementos más abundantes en la corteza terrestre, precediendo únicamente al Oxígeno y al Silicio. Pese a este hecho y a su conocimiento ya en la antigüedad clásica bajo el nombre de alumbre, hubo que esperar hasta el siglo XIX cuando se identificó como elemento químico y concretamente hasta 1827, cuando se consiguió aislar completamente como elemento único.

El Aluminio es un metal no ferro magnético que no es posible encontrar en estado puro, sino que se encuentra combinado con el oxígeno, en el óxido Al_2O_3 conocido como Alúmina. La alúmina se encuentra en una gran variedad de compuestos de la corteza terrestre, pero se encontró por primera vez y precisamente en el compuesto que mayor concentración de alúmina presenta, en un mineral rojizo y arcilloso llamado bauxita. La bauxita presenta un porcentaje de alúmina en torno al 58 %, dato por el cuál es el único mineral del que se extrae aluminio como metal.

La alúmina se separa del resto de compuestos que forman la bauxita mediante el proceso Bayer, que consiste básicamente en el lavado de fragmentos de bauxita con una solución caliente de sosa disolviendo únicamente los minerales de aluminio. Una vez se tiene alúmina, se expone esta a un proceso de electrólisis obteniendo finalmente el aluminio metálico. Estos procesos requieren de un elevado gasto energético, razón por la cual si el porcentaje de alúmina en el mineral es bajo (inferior al 30%) su extracción no resulta rentable.

El elevado precio de su extracción resulta compensado por el bajo costo de su reciclaje, unido al hecho de ser un material prácticamente creado por la ciencia, hace que sea uno de los metales con mayor vocación de futuro.

Gracias al constante progreso en su producción y a su excelente combinación de propiedades: su ligereza, conductividad eléctrica y térmica, resistencia a la corrosión, maleabilidad y bajo punto de fusión; han convertido al aluminio en el material perfecto para una gran variedad de aplicaciones, sustituyendo a materiales comúnmente empleados como la madera, el hierro y el cobre, e incluso ha ido comiendo terreno al acero, siendo este el material más empleado en la actualidad.

2.1.2 CARACTERÍSTICAS.

La excelente combinación de características que posee el aluminio y que han producido su extensión en multitud de ámbitos de la utilización industrial se describen a continuación:

- **Ligereza.** El aluminio es considerado un metal ligero con una densidad de 2.7 kg/m^3 , hasta el punto que su peso es tres veces inferior al del acero para un mismo volumen, lo que permite grandes ahorros de peso en su aplicación.
- **Duración.** Su gran afinidad con el oxígeno, hacía suponer un mal comportamiento ante la oxidación, todo lo contrario, es esta afinidad con el oxígeno para formar óxido Al_2O_3 lo que confiere al aluminio de una magnífica resistencia ante la corrosión, debido a que el volumen específico de este, su óxido estable, es superior al del metal lo que da lugar al proceso conocido como **pasivación**. La pasivación es el proceso por el cual se forma una delgada película de alúmina que recubre la superficie del material, protegiéndolo ante la acción de una oxidación posterior y corrosión. Esta fina película de óxido también protege al aluminio de la acción de otros agentes externos como pueden ser productos químicos, exposición duradera a la intemperie o el agua marina. Debe quedar claro que este hecho no confiere al aluminio de una completa inmunidad ante agentes externos pero si prolonga su duración de uso.
- **Conductividad.** El aluminio posee una excelente conductividad tanto eléctrica como térmica. Aunque estas resultan algo inferiores a la conductividad del cobre (la conductividad del aluminio se encuentra en torno a $2/3$ de la del cobre) su relación conductividad-peso es superior, hecho que significó la apuesta definitiva por el aluminio en el mercado del transporte de energía eléctrica, ya que permite crear líneas de cable de gran longitud capaces de transportar el doble de energía que las líneas de cable de cobre con el mismo peso.
- **No tóxico.** El aluminio ha sido considerado como material atóxico, por lo que resulta idóneo para la fabricación de utensilios de cocina, papel de embalaje de alimentos (papel de aluminio) y de envases de conservación de alimentos y bebidas. Pese a esta consideración, han aparecido vertientes de pensamiento cuestionándose la no toxicidad del aluminio. Se ha probado que el contacto continuado con concentraciones importantes de aluminio pueden llegar a causar efectos negativos sobre los sistemas biológicos, tanto para plantas, animales y seres humanos.
- **Buenas propiedades de reflexión.** Buenas propiedades ópticas, alto poder de reflexión de la radiación electromagnética del espectro visible y del térmico.
- **Maleabilidad y ductibilidad.** Una de las características más importantes que ha hecho posicionar al aluminio como uno de los materiales más utilizados en el ámbito industrial es su excelente maquinabilidad. Se trata de un material de fácil transformación mediante

cualquiera de las técnicas de conformado. Puede ser laminado para obtener placas de muy bajo espesor, extruido y lograr perfiles de elevada complejidad, forjado, doblado, embutido y estampado.

- **Reciclabilidad.** El aluminio es un material de fácil reciclado, cuyo coste energético es un 95 % inferior al de su obtención por extracción, lo que ha significado que una cuarta parte de las necesidades de aluminio en Europa son satisfechas mediante aluminio de segunda fusión. Además el aluminio reciclado mantiene completamente todas sus propiedades originales lo que hace posible su reciclado una y otra vez de manera indefinida.
- **Versatilidad.** La capacidad del aluminio de aleación con otros metales hacen posible la utilización de este material en ámbitos que a priori no tiene cabida. Las aleaciones permiten variar las propiedades del aluminio mejorando considerablemente las propiedades en procesos en los que este presenta problemas. Por el ejemplo en procesos de moldeo, en el que su capacidad de reacción con la humedad hace que se genere hidrógeno y con ello porosidad en las piezas resultantes, o en los trabajos en frío en los que el aluminio es un material mecánicamente débil pero podemos aumentar su resistencia mediante la aleación.

A continuación se recoge en tablas las propiedades atómicas, eléctricas, térmicas, físicas y mecánicas del aluminio.

PROPIEDADES ATÓMICAS	
Símbolo	Al
Clasificación	Elementos térreos Grupo 13 Otros Metales
Número Atómico	13
Masa Atómica	26,9815
Número de protones/electrones	13
Número de neutrones (Isótopo 27-Al)	14
Estructura electrónica	[Ne] 3s ² 3p ¹
Electrones en los niveles de energía	2, 8, 3
Números de oxidación	3
Electronegatividad	1,61
Energía de ionización (kJ/mol)	577
Afinidad electrónica (kJ/mol)	43
Radio atómico (pm)	143
Radio iónico (pm) (carga del ion)	53 (+3)
Entalpía de fusión (kJ/mol)	10,67
Entalpía de vaporización (kJ/mol)	293,72

Tabla 2.1.2. 1 – Propiedades atómicas del aluminio [1].

PROPIEDADES FÍSICAS	
Color	Metálico
Densidad (g/dm ³)	2,699
Punto de ebullición (°C)	2057-2480
Punto de fusión (°C)	660,2
Cambio volumétrico durante la solidificación (%)	6,7

Tabla 2.1.2. 2 – Propiedades físicas del aluminio [1].

PROPIEDADES ELÉCTRICAS	
Conductividad eléctrica (m/Ωmm ²)	34-48
Coeficiente de Temperatura (K ⁻¹)	0,0045 (0-100°C)
Resistividad eléctrica (μΩcm)	2,69 (20°C)
Temperatura crítica de superconductividad (K)	1,175

Tabla 2.1.2. 3 – Propiedades eléctricas del aluminio [1].

PROPIEDADES TÉRMICAS	
Calor latente de fusión (J/g)	388
Calor latente de evaporización (J/g)	10800
Conductividad térmica (W/mK)	237 (0-100°C)
Coeficiente lineal de expansión térmica (x 10 ⁻⁶ /K)	23,5 (0-100°C)
Viscosidad (mNsm ⁻²)	1,1 (700°C)
Calor de fusión (MJkg ⁻¹)	31
Calor específico (J/K Kg)	900 (25°C)

Tabla 2.1.2. 4 – Propiedades térmicas del aluminio [1].

PROPIEDADES MECÁNICAS	
Límite elástico (MPa)	110-170
Coeficiente de Poisson	0,35
Resistencia a la tracción (MPa)	130-195
Alargamiento (%)	40
Dureza- Vickers	35-48
Módulo volumétrico (MPa)	75,2
Módulo de elasticidad (MPa)	70,6

Tabla 2.1.2 5 – Propiedades mecánicas del aluminio [1].

2.1.3 ALEACIONES DE ALUMINIO (AA).

En la búsqueda científica hacia la mejora de las propiedades mecánicas del aluminio debido al hecho de ser un material dúctil y maleable y a la necesidad de una mayor resistencia mecánica y dureza para resultar el material escogido en determinadas aplicaciones, aparecieron las aleaciones como la combinación de este metal con otros elementos como el magnesio, manganeso, zinc, silicio y cobre, entre otros.

En la industria actual, las aleaciones de aluminio son conocidas como aleaciones ligeras debido a su baja densidad, aproximadamente una tercera parte de la densidad del acero. Precisamente, esta condición de baja densidad ha provocado que la extensión de su uso en diferentes ámbitos de la industria como la aeronáutica o automotriz, existiendo en la actualidad más de 300 aleaciones de aluminio registradas.

Las numerosas aleaciones de aluminio son clasificadas en dos grupos, dependiendo del proceso de fabricación utilizado: aluminos laminados y fundiciones de aluminio.

Los aluminos laminados poseen una designación internacional de cuatro dígitos para identificarlos rápidamente. Esta designación está realizada según la norma H35.1 de la American National Standard Institute (ANSI).

Por otro lado, las aleaciones fundidas se codifican de acuerdo a la nomenclatura ASTM B275 emitida igualmente por el ANSI.

A continuación se presenta dicha designación en la **Tabla 2.1.3. 1** y **Tabla 2.1.3. 2**, respectivamente.

CODIFICACIÓN ALUMINIOS LAMINADOS	
Aluminio puro 99.0 pureza	1XXX
Aluminio aleado principalmente con cobre	2XXX
Aluminio aleado principalmente con manganeso	3XXX
Aluminio aleado principalmente con silicio	4XXX
Aluminio aleado principalmente con magnesio	5XXX
Aluminio aleado principalmente con magnesio y silicio	6XXX
Aluminio aleado principalmente con zinc	7XXX
Aluminio aleado con otros elementos (litio)	8XXX

Tabla 2.1.3. 1 – Codificación aluminos laminados según normativa H35.1 del ANSI.

CODIFICACIÓN FUNDICIONES DE ALUMINIO	
Fundición de aluminio puro 99.0 pureza	1XX.X
Fundición de aluminio aleado principalmente con cobre	2XX.X
Fundición de aluminio aleado principalmente con silicio y adiciones de cobre y/o magnesio	3XX.X
Fundición de aluminio aleado principalmente con silicio	4XX.X
Fundición de aluminio aleado principalmente con magnesio	5XX.X
Fundición de aluminio aleado principalmente con zinc	7XX.X
Fundición de aluminio aleado principalmente con estaño	8XX.X
Fundición de aluminio aleado principalmente con otros elementos	9XX.X

Tabla 2.1.3. 2 – Codificación fundiciones de aluminio según normativa B275 del ANSI.

Las aleaciones de aluminio tanto los aluminos laminados y las fundiciones de aluminio se ha visto que se clasifican según el elemento aleante que se encuentra en mayor proporción. Los elementos aleantes más usados son:

- **Aluminio puro.**

Conocidos como ALPUR, contienen aluminio en un 99% lo que confiere al material una excelente resistencia a la corrosión, una gran conductividad eléctrica y térmica y una

excelente acritud a las deformaciones, debido a sus bajas propiedades mecánicas. Sus principales aplicaciones se encuentran en la industria eléctrica y química.

- **Cobre.**

Comúnmente denominadas Cobral. En este tipo de aleaciones el principal elemento aleante es el cobre, aunque a veces también se le añade magnesio. Las características más significativas de esas aleaciones son: una buena relación dureza-peso, incluso son sometidas a tratamientos térmicos de solubilización para conferir a la aleación propiedades mecánicas muy similares a las del acero al carbono, sin embargo mantienen la buena maquinabilidad y ligereza del aluminio; su resistencia a corrosión disminuye respecto a las aleaciones sin cobre.

- **Manganeso.**

En aleaciones en las que el principal elemento aleante es el manganeso, únicamente es posible aumentar la resistencia del aluminio puro en un 20%, debido a que el manganeso sólo se puede añadir de forma efectiva en un porcentaje del 1.5%. Razón por la cual existe un número muy limitado de aleaciones de este tipo. Estas aleaciones no son tratables térmicamente, aunque se encuentran en marcha investigaciones al respecto. Poseen una dureza media y una buena trabajabilidad, por lo que resultan idóneas para la fabricación de paneles de revestimientos en la construcción y en la industria culinaria, donde destaca la aleación 3004, empleada para la fabricación de los cuerpos de las latas de conserva y escogida para la elaboración del modelo presentado en este trabajo de fin de grado.

- **Silicio.**

En este tipo de aleaciones se puede añadir el silicio de en cantidades por encima del 12%, con el objetivo de disminuir considerablemente el rango de fusión del aluminio puro y poder ser utilizado como material de aporte en las soldaduras. No son tratables térmicamente pero cuando son utilizadas para soldar otras aleaciones si tratables térmicamente, parte de sus aleantes pasan a la aleación aluminio- silicio convirtiéndose en tratables térmicamente. Son muy empleadas en aplicaciones arquitectónicas.

- **Magnesio.**

La adición de magnesio supone un incremento de la dureza del material de una manera más acentuada que mediante la adición de manganeso (un 0.8% de magnesio produce el mismo efecto que un 1.25% de manganeso), pero rara vez se encuentra más del 5% de magnesio debido a que en esos casos sus propiedades mecánicas decrecen cuando se expone la aleación a la influencia térmica. Sus características principales se encuentran en una alta dureza por endurecimiento por deformación, buena resistencia a corrosión, buena soldabilidad y una baja capacidad de trabajo en frío debido a este aumento considerable de

su dureza. Se usan para la fabricación de partes de puente grúa, estructuras de automóviles, iluminación de las calles, motivos decorativos, carreteras...

- **Magnesio - silicio.**

Se caracterizan por la adición de magnesio y silicio en cantidades adecuadas para la formación de Mg_2Si , para conseguir que la aleación sea tratable térmicamente. Aunque son menos resistentes que el resto de aleaciones poseen una buena formabilidad, soldabilidad, maquinabilidad y resistencia a corrosión. Son ampliamente en la fabricación de cuadros de bicicletas y en aplicaciones arquitectónicas.

- **Zinc.**

Conocidas como duraluminio. El zinc se añade en porcentajes que van del 1 al 8% y en ocasiones con pequeñas cantidades de magnesio para conseguir que sean tratables térmicamente y de esta manera aumentar su resistencia. Su característica principal es su alta resistencia por lo que son muy utilizadas para fabricar las estructuras de los aviones y equipos móviles, en contra poseen una baja resistencia a la corrosión.

Sin embargo, la clasificación de las aleaciones de aluminio no acaba con su designación según el aleante encontrado en mayor porcentaje, sino que también se pueden encontrar clasificadas conjuntamente al criterio anterior según el estado en el que se encuentran.

La clasificación mencionada es presentada en la **Tabla 2.1.3. 3**.

- Para estado H1 se puede encontrar un segundo dígito H1X. Este segundo dígito toma valores de 1 al 9 e indica la dureza que ha sido transmitida al material mediante la deformación en frío.
- Igualmente, se pueden encontrar variantes al estado T añadiendo un segundo dígito TXX. Estos dos dígitos son específicos para cada producto y se usan para el estado de alivio de tensiones en productos fabricados mediante el proceso de forja.

CLASIFICACIÓN POR SU ESTADO	
F	Estado bruto, tal y como sale del proceso de fabricación.
O1	Recocido a elevada temperatura y enfriamiento lento.
O	O2 Sometido a tratamiento termo mecánico.
O3	Homogeneizado.
W	Solución tratada térmicamente.
H1	Endurecido por deformación en frío y sin tratamiento posterior.
H	H2 Endurecido en exceso por deformación y recocido parcial.
H3	Acritud y estabilizado.
H4	Acritud y lacado o pintado.
T	T1 Enfriado desde un proceso de fabricación a elevada temperatura y envejecido de forma natural
T2	Enfriado desde un proceso de fabricación a elevada temperatura, trabajado en frío y envejecido de forma natural
T3	Solución tratada térmicamente, trabajada en frío y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable.
T4	Solución tratada térmicamente y envejecida a temperatura ambiente hasta alcanzar una condición estable.
T5	Enfriamiento desde un proceso de fabricación a alta temperatura y envejecida artificialmente.
T6	Solución tratada térmicamente envejecida artificialmente.
T7	Solución tratada térmicamente y sobre envejecida para su completa estabilización.
T8	Térmicamente tratada por disolución, trabajada en frío y envejecida artificialmente.
T9	Solución tratada térmicamente, envejecida artificialmente y trabajada en frío.

Tabla 2.1.3. 3 – Clasificación de las aleaciones de aluminio según su estado.

Así pues, a la vista de la **Tabla 2.1.3. 1** y de la **Tabla 2.1.3. 3**, el material escogido para ser laminado en el modelo numérico desarrollado en este trabajo de fin de grado, AA 3004 - H19, es una aleación de aluminio y principalmente manganeso, que ha sido sometido a un proceso de deformación en frío.

2.1.4 APLICACIONES PRINCIPALES.

Gracias a su excelente combinación de propiedades el aluminio y sus aleaciones pueden ser trabajadas mediante una gran variedad de procesos: soldadura, forja, extrusión, laminación, moldeo, entre otros. Razones por las cuales se encuentran en múltiples aplicaciones y su uso sigue una constante evolución al alza.

Los principales usos industriales de aluminio y sus aleaciones metálicas son las siguientes:

- **Construcción:** Debido al concepto de ligereza asociado siempre al aluminio era inimaginable pensar en la posibilidad de encontrar edificios cuya estructura fuera de aluminio, pero la constante evolución e investigación a la que está sometida este material ha hecho posible encontrar en la actualidad diversos edificios realizados bajo este concepto. Entre ellos es destacable el edificio Aluminium Forest (Utrecht, Holanda) con el que el gobierno holandés quería mostrar al resto del mundo la calidad de su aluminio nacional.



Figura 2.1.4. 1 – Aluminium Forest (Utrecht, Holanda) [2].

- **Carpintería metálica:** fachadas, puertas, ventanas, galerías, persianas, etc.
- **Transporte:** El sector de los transportes es el que mayor uso del aluminio realiza, aproximadamente un tercio de todo el metal consumido en Europa. Esto es debido a su extraordinaria relación resistencia – peso y al hecho de que mover peso cuesta energía, concepto que siempre es el primero que hay que tener en cuenta cuando se está realizando proyectos de la envergadura de los realizados en sectores como el aeronáutico, automovilístico, ferrocarriles. Además su buena resistencia a la corrosión lo hacen idóneo para la construcción de los cascos de los barcos. Se fabrican motores, bielas, elementos de la carrocería, intercambiadores de calor, etc.

- **Embalaje de alimentos:** papel de aluminio, latas, tetrabriques, etc.
- **Sector doméstico:** El aluminio se puede encontrar en más productos de la vida cotidiana de los que en un principio se piensa. Es utilizado para la fabricación de electrodomésticos, baterías de cocina, mobiliario, cabinas de ducha, componentes decorativos, equipos de iluminación, equipamiento para la realización de actividades deportivas, etc.
- **Transmisión eléctrica:** El aluminio es uno de los materiales más extendidos en la industria eléctrica, pese a que su conductividad eléctrica se encuentra en torno a un 60% de la conductividad que posee el cobre. Esto es debido a que su relación conductividad – peso es mayor, por lo que un conductor de aluminio de igual peso es capaz de transportar la energía a mayor distancia que un conductor de cobre. Además, esta ligereza permite aumentar la distancia entre torres de alta tensión y reduce la carga que deben soportar estas torres, lo que se traduce en un importante ahorro en infraestructuras.



Figura 2.1.4. 2 – Imagen de cable desnudo de cobre (parte superior de la figura) y de aluminio (parte inferior de la figura).

- **Reflectores y pinturas:** Gracias a su poder reflectante y a la posibilidad de encontrarlo en forma de polvo fino es utilizado en la fabricación de pinturas de color metalizado.
- **Recipientes criogénicos:** Debido al hecho de que el aluminio no presenta temperatura de transición de dúctil a frágil, la tenacidad de este es mejor a bajas temperaturas, por lo que resulta idóneo para la fabricación de estos recipientes criogénicos capaces de soportar temperaturas de hasta -200°C.
- Su gran capacidad para combinar con el oxígeno resulta idóneo para su uso como **combustible**, como **desoxidante** en la fabricación de acero o como material de aporte en **soldaduras**.
- El aluminio puro rara vez es utilizado, destaca en la fabricación de espejos tanto de uso doméstico como para telescopios.

Aunque sólo se han presentado los sectores más importantes en los que se hace uso de aluminio o de alguna de sus aleaciones, verdaderamente son pocos los sectores en los que no se utilizan y cada vez menos, debido a que el gusto de arquitectos, diseñadores, ingenieros, constructores y usuarios finales hacia estos hará que su uso aumente progresivamente.

2.2 PROCESO DE CONFORMADO POR LAMINACIÓN.

2.2.1 INTRODUCCIÓN.

Una gran parte de la producción metálica industrial en la actualidad está compuesta por la producción de chapas y láminas metálicas obtenidas mediante los procesos de laminación, ya sea en frío o en caliente, debido al ahorro en material siempre adherido a este tipo de proceso, lo que se traduce en la reducción del coste del producto. Estos productos fabricados mediante procesos de laminación gozan de una gran fama ya que sus características principales como su buena resistencia mecánica y su excelente relación resistencia – peso, hacen que resulten muy atractivos para los clientes. Estos productos son de una gran variedad, desde productos de la vida cotidiana como revestimientos de electrodomésticos o latas de conservas y bebidas, hasta aplicaciones más sofisticadas como pueden ser elementos de construcción, fuselaje de aviones o carrocerías de automóviles, entre otras.



Figura 2.2.1. 1 – Productos obtenidos mediante procesos de laminación.

La laminación es un proceso de deformación en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos [3]. El giro de estos rodillos provoca que el material vaya pasando entre ellos a medida que se produce la reducción de espesor. Esto implica que la forma del material vaya cambiando pero con ventaja de no perder básicamente volumen de material y sin producirse la fusión del mismo, por lo que resulta completamente necesario que el material sufra deformación plástica sin llegar en ningún momento del proceso a la fractura.

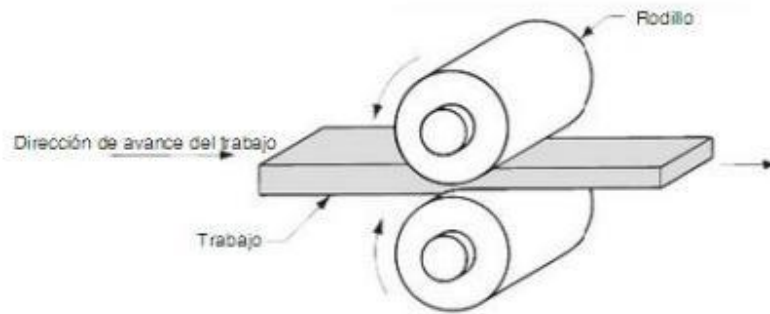


Figura 2.2.1. 2 – Proceso de laminación [3].

El proceso de laminado como ha quedado dicho anteriormente puede realizarse tanto en frío como en caliente. Los términos frío y caliente hacen referencia a si el material a procesar se encuentra a una temperatura por debajo o por encima respectivamente de su temperatura de cristalización.

La laminación en frío se aplica cuando son requeridas reducciones menos severas debido a que son necesarios esfuerzos mayores y se aparecen tensiones residuales en la superficie del material, sin embargo se obtiene un material con mejores propiedades mecánicas y mejor acabado, idóneo para piezas con tolerancias más estrechas. Además la laminación en frío no es sólo utilizado en procesos de reducción de espesor, sino que en ocasiones únicamente se utiliza para mejorar la resistencia del material mediante el endurecimiento por deformación.

En contraposición, la laminación en caliente es aplicada cuando se requieren grandes reducciones de espesor, ya que se requieren menores esfuerzos, por lo que generalmente el material final se encuentra libre de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Proceso idóneo para reducciones severas en piezas en las que el acabado no es lo más importante y en cuyas tolerancias no sean muy estrechas, puesto que es muy difícil mantenerse dentro de ellas. Además se corre el riesgo de la formación de una capa de óxido característica en su superficie.

La extensión e importancia en el ámbito industrial y comercial del proceso de laminación ha sido incrementada por el hecho de que estos procesos producen pocos o ningún desperdicio como subproducto de la operación, hecho muy importante en tiempos en los que la preocupación por el ahorro, el reciclaje y en general por el medio ambiente la reducción de desperdicios se encuentra entre los primeros objetivos a llevar a cabo.

Como es de esperar, no todo son ventajas en los procesos de conformado por laminación. Para llevar a cabo un proceso de laminación es necesario en un principio de disponer de una importante holgura económica, ya que involucran una gran inversión de capital inicial. Requieren piezas de equipo pesado denominadas molinos laminadores o de laminación, por lo que para compensar esta gran inversión usualmente son utilizados para producir grandes series de artículos estándar, como láminas o placas.

Dentro de los procesos de laminación tanto en frío como en caliente se pueden destacar distintos tipos de laminado en función del resultado que se desee obtener.

2.2.2 LAMINADO PLANO.

Cuando se habla de laminado plano, se hace referencia a la reducción de espesor de piezas de trabajo de sección transversal rectangular con un ancho mayor que el espesor, planchas, tiras, láminas y placas, por lo que se trata del laminado clásico que se viene a la cabeza cuando se alude a la laminación y que se muestra en la **Figura 2.2.1. 2** y en la **Figura 2.2.2. 1**.

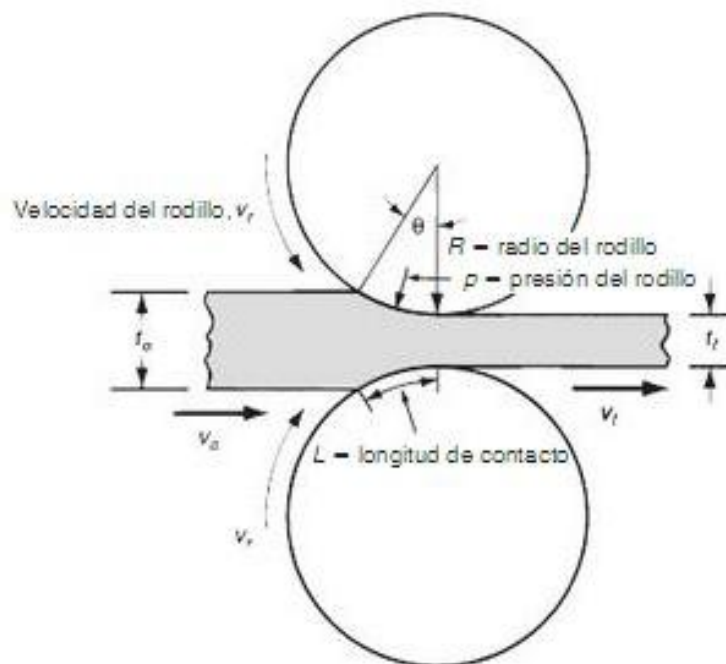


Figura 2.2.2. 1 – Vista lateral del laminado plano [3].

Como se puede observar a la perfección en la **Figura 2.2.2. 1**, en el laminado plano el trabajo es realizado por los dos rodillos que ejercen presión al material de manera que su espesor se reduce en una cantidad denominada *draft*.

$$d = t_f - t_0 \quad (\text{Ecuación 2.2.2.1})$$

Donde:

- d es la cantidad de espesor reducida “draft” (mm).
- t_f es el espesor final del material (mm).
- t_0 es el espesor inicial del material (mm).

El draft al fin y al cabo es una expresión de la reducción de espesor producida al material, siendo la reducción:

$$r = \frac{d}{t_0} \quad (\text{Ecuación 2.2.2.2})$$

Donde r es la reducción. Si la reducción del material es realizada en sucesivas pasadas, la reducción será la suma de los adelgazamientos de espesor dividida entre el espesor original.

Pero durante un proceso de laminado no sólo se reduce el espesor sin más, sino que usualmente se incrementa el ancho del material de trabajo, este fenómeno es denominado con el nombre de *esparcido*. El esparcido tiende a ser mayor cuanto menor es la relación existente entre el ancho y el espesor, al igual que aumenta cuando se dan bajos coeficientes de fricción.

El proceso de laminación se rige básicamente por un principio de conservación del material, de tal manera que el volumen de metal que sale de los rodillos es igual al volumen de metal que entra en ellos:

$$t_0 w_0 L_0 = t_f w_f L_f \quad (\text{Ecuación 2.2.2.3})$$

Donde:

- w_0 es el ancho inicial del material (mm).
- w_f es el ancho del material ya laminado (mm).
- L_0 es la longitud inicial del material (mm).
- L_f es la longitud del material ya laminado (mm).

De la misma manera, se pueden relacionar las velocidades de entrada y salida del material, puesto que la velocidad volumétrica del flujo de material antes y después del laminado debe de coincidir:

$$t_0 w_0 v_0 = t_f w_f v_f \quad (\text{Ecuación 2.2.2.4})$$

Donde:

- v_0 es la velocidad de entrada del material de trabajo.
- v_f es la velocidad de salida del material de trabajo.

Cada rodillo tiene un radio R y su velocidad de rotación tiene una velocidad superficial, siendo esta mayor que v_0 y menor a v_f . Unido al hecho de que el flujo de metal es en todo momento continuo, hay un cambio gradual en la velocidad del material de trabajo entre los rodillos. El contacto material – rodillo se produce a lo largo del arco de contacto definido por el ángulo θ que se muestra en la **Figura 2.2.2. 1**, en el cual existe un punto en el que la velocidad de trabajo iguala a la velocidad del rodillo.

Este punto se llama *punto de no deslizamiento* o *punto neutro*, y es el punto en el que a cualquier lado de él se produce deslizamiento y fricción entre el rodillo y el material de trabajo. Este deslizamiento entre los rodillos y el material es cuantificable, es medido a partir del término deslizamiento hacia delante, defino mediante la siguiente expresión:

$$s = \frac{v_f - v_0}{v_0} \quad (\text{Ecuación 2.2.2.5})$$

Siendo s el deslizamiento hacia delante.

La fricción que se presenta en el proceso de laminación, queda definida mediante el coeficiente de fricción y una fuerza de compresión ejercida por los rodillos, multiplicando ambos da lugar a la fuerza de fricción entre los rodillos y el material de trabajo. Esta fuerza de fricción tendrá una dirección a un lado del punto neutro, y la dirección opuesta en el lado contrario. Pero el laminado es posible debido a que los valores de ambas fuerzas no son iguales, la fuerza de fricción es mayor a la entrada que a la salida, de manera que la fuerza neta realice el trabajo a través de los rodillos.

El coeficiente de fricción determina el draft máximo admisible para que el laminado sea posible.

$$d_{m\acute{a}x} = \mu^2 R \quad (\text{Ecuación 2.2.2.6})$$

Donde:

- μ es el coeficiente de fricción.
- R es el radio del rodillo (mm).

A su vez, el coeficiente de fricción queda definido por numerosos factores, como lubricación, material de trabajo y temperatura de trabajo. Además en los procesos de laminación en caliente influye notablemente el fenómeno de *adherencia*, donde la superficie de material de trabajo calentada se queda pegada a los rodillos sobre el arco de contacto y por tanto el coeficiente de fricción aumenta considerablemente. Esto es debido a que como consecuencia del fenómeno de adherencia las capas de la superficie del material de trabajo no se pueden mover a la misma velocidad que la velocidad del rodillo y debajo de la superficie la deformación es más acusada para lograr el paso del material a través de la obertura entre rodillos.

Por tanto una vez que se disponga de un coeficiente de fricción suficiente para realizar el laminado, ha quedado dicho que se requiere una fuerza de rodillo lo suficientemente grande como para conseguir la separación apropiada entre rodillos, que es calculable mediante la siguiente expresión.

$$F = w \int_0^L p \, dL \quad (\text{Ecuación 2.2.2.7})$$

Donde:

- F es la fuerza de laminación (N).
- w es el ancho del material de trabajo que está siendo laminado (mm).
- p es la presión de laminado (MPa).
- L es la longitud de contacto entre rodillo y material (mm).

A los resultados obtenidos por esta expresión, se les puede realizar una aproximación mediante una ecuación fundamentada en el esfuerzo de fluencia promedio que experimenta el material de trabajo en la obertura entre los rodillos, que será vista y utilizada durante el proceso de validación del modelo numérico de este trabajo de fin de grado.

La integración presentada requiere dos términos separados, uno a cada lado del punto neutro, 0 y L han sido escogidos. Esto es debido a que las variaciones en la presión del rodillo a lo largo de la longitud de contacto son muy significativas, como se puede observar en la **Figura 2.2.2. 2**.

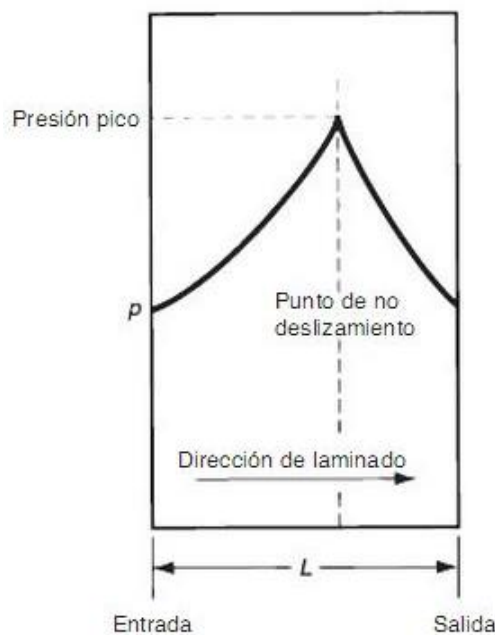


Figura 2.2.2. 2 – Variación de la presión a lo largo de la longitud de contacto en el laminado plano [3].

Se puede observar como la presión alcanza su máximo valor cuando se encuentra en el punto neutro o punto de no deslizamiento y va disminuyendo cuanto más se acerca tanto a los valores de la entrada como a los valores de la salida. Al aumentar la fricción, el punto neutro se corre hacia el valor de la entrada, contrariamente al disminuir la fricción el punto neutro se corre hacia el valor de la salida a fin de mantener una fuerza neta que haga que el material fluya en la dirección del laminado. Pero si la fricción es muy baja el material podría deslizarse en lugar de pasar entre los rodillos.

La posición a lo largo de longitud de contacto en que se alcanza el valor máximo de presión, ha sido motivo de un estudio exhaustivo que se puede encontrar en la literatura científica [4] y que se explicará a continuación en el punto 2.4 del índice titulado “ENSAYOS DE LA LITERATURA”.

2.2.3 LAMINACIÓN DE PERFILES.

En el proceso de laminación de perfiles el material de trabajo se deforma para generar un contorno en la sección transversal. Esto se consigue haciendo pasar el metal a laminar por unos rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada. Con este tipo de laminado se producen los rieles para las vías de ferrocarril, vigas de construcción con perfiles en T, doble T, canales en U, etc.

Los principios por los que se rige el laminado de perfiles son prácticamente los mismos principios que se aplican en el laminado plano. Los rodillos formadores son más complejos y el material inicial de forma generalmente cuadrada requiere de una transformación gradual a través de varios rodillos

hasta la obtener la sección final. Por lo tanto hay que tener claro qué forma se quiere obtener en cada secuencia y el rodillo que se necesita para ello, este hecho se conoce como diseño de pases de laminación, y tiene como objetivo final lograr una deformación uniforme a través de las secciones transversales de cada reducción. Si no se consiguen estas deformaciones uniformes se pueden dar problemas de torceduras y agrietamiento del producto final ya laminado.

2.2.4 MOLINOS LAMINADORES.

Se dispone de varias configuraciones de molinos de laminación con las que conseguir hacer frente a las distintas aplicaciones y problemas técnicos en los procesos de laminación. A continuación se presentarán dichas configuraciones.

- **Molino de laminación de dos rodillos.** Se trata del molino de laminación básico y como su propio nombre indica se trata de dos rodillos opuestos. Estos poseen diámetros que van de 0.6 m a 1.4 m y su configuración puede ser reversible o no reversible. En el ***molino no reversible*** sus rodillos giran en todo momento en el mismo sentido y por tanto el material de trabajo pasa siempre a través del mismo lado, mientras que en el ***molino reversible*** sus rodillos pueden girar en ambos sentidos de manera que el material puede pasar a través de cualquiera de los lados, lo que permite realizar reducciones sucesivas a través del mismo juego de rodillos pasando el material continuamente en direcciones opuestas, pero esta configuración acarrea problemas técnicos fruto de esta reversibilidad.

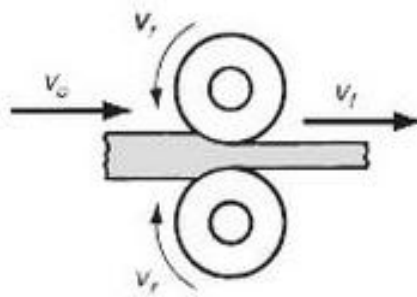


Figura 2.2.4. 1 – Molino de laminación de dos rodillos [3].

- **Molino de laminación de tres rodillos.** Esta configuración alterna, consiste en tres rodillos colocados en columna vertical, donde el sentido de giro de estos permanece sin cambio. Para lograr una serie de reducciones se puede pasar el material de trabajo en cualquiera de sus direcciones, ya sea subiendo o bajando el material en cada uno de los pasos por la columna de rodillos, mediante un mecanismo elevador.

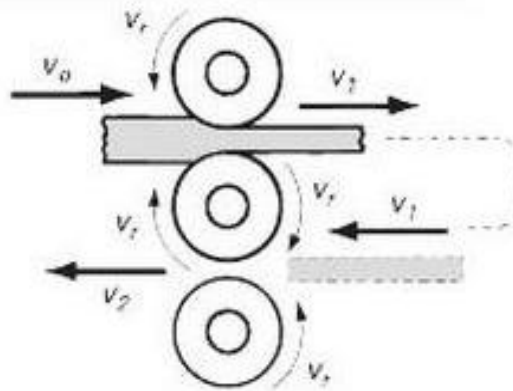


Figura 2.2.4.2 – Molino de laminación de tres rodillos [3].

- **Molino de laminación de cuatro rodillos.** La configuración de cuatro rodillos consiste en el uso de dos rodillos de menor diámetro que hacen contacto con el material y otros dos rodillos de diámetro mayor como respaldo de estos, para evitar que los rodillos menores sufran desviaciones elásticas. Al reducir el diámetro de los rodillos reduce la longitud de contacto material – rodillo, al igual que el trabajo, lo que conlleva fuerzas más bajas, un momento de torsión menor y menor potencia.

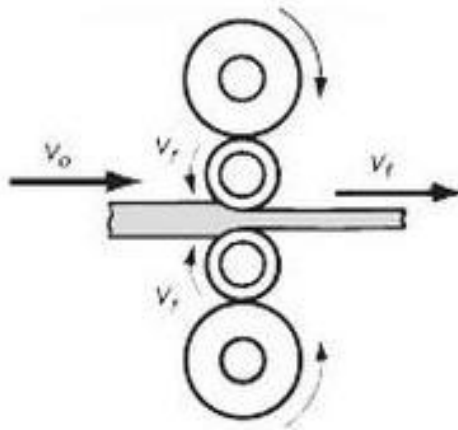


Figura 2.2.4. 3 – Molino de laminación de cuatro rodillos [3].

- **Molino en conjunto o racimo.** Los principios por los que se rige, son exactamente los mismos que los del molino de laminación de cuatro rodillos. Con la diferencia de que son utilizados rodillos de menor diámetro, a los que hay que añadir otro rodillo de mayor diámetro a cada uno de ellos para que se realice la función de respaldo correctamente.

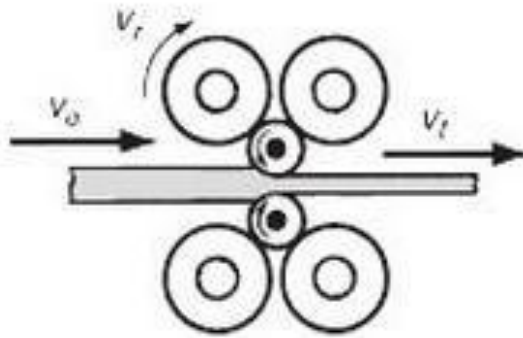


Figura 2.2.4. 4 – Molino en conjunto o racimo [3].

- **Molino de rodillos en tándem o tren de laminación.** Esta configuración consiste en una serie de bastidores de rodillos, pueden llegar a tener 10 pares de rodillos, en el que cada par realiza una reducción en el espesor de manera progresiva o un refinamiento de la forma del material que pasa a través de ellos. A cada paso por un par de rodillos se va incrementando la velocidad, con la consiguiente dificultad de sincronizar las velocidades de los rodillos.

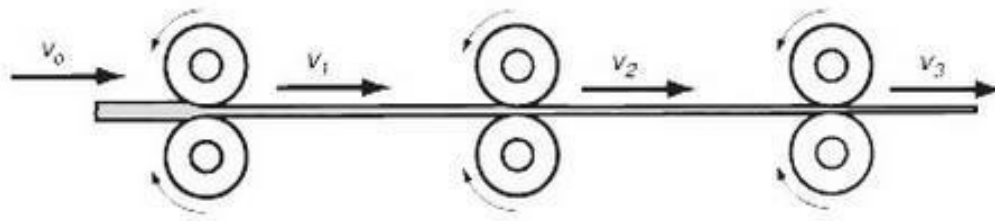


Figura 2.2.4. 5 – Molino de rodillos en tándem o tren de laminación [3].

2.3 ENSAYOS DE LA LITERATURA.

Ante la imposibilidad de llevar a cabo procesos experimentos de procesos de conformado por laminado plano de la aleación de aluminio – manganeso, AA 3004 H-19, se ha buscado en la literatura científica artículos en los que se muestran los resultados obtenidos al llevar a cabo estas experiencias.

Para la búsqueda de artículos científicos sobre el tema tratado, se ha intentado utilizar artículos publicados lo más recientes posibles y en revistas con la mayor repercusión en el ámbito nacional e internacional.

Es necesario comentar que el laminado plano a priori parece tan sencillo y con tan pocas opciones de estudio innovadoras, puesto que parece que ya se conoce todo sobre este, que fue complicado encontrar artículos de la calidad requerida de los que poder extraer la información necesaria para desarrollar el modelo numérico propuesto y con los que poder comparar los resultados obtenidos.

2.3.1 ANÁLISIS NUMÉRICO DE LA LAMINACIÓN PLANA EN FRÍO DEL ALUMINIO AA 3004.

Este artículo fue realizado por R. A. Ortiz, C. Vallengano y F. J. García-Lomas, todos ellos pertenecientes al departamento de Ingeniería Mecánica y Fabricación de la Universidad de Sevilla. El artículo fue publicado en el 2002 en el volumen 15 de la revista “Metal Univers (Molins de Rei)” y en el 2003 en el volumen 14 de la revista “Anales de la ingeniería mecánica” [4].

En este artículo se analizan las distribuciones de tensión en el contacto rodillo – material de trabajo y la evolución de las tensiones residuales en el material, todo ello para diferentes porcentajes de reducción de espesor.

Con ello los autores querían otorgar a los procesos de laminado plano en los que la deformación resulta ser no homogénea la importancia que se merecen, puesto que el número de trabajos existentes dedicados a esta situación concreta de gran interés e importancia práctica es más bien escaso.

Los estudios realizados sobre el proceso de laminado plano hasta la actualidad, han dejado clara la existencia de dos patrones bien diferenciados en las distribuciones de la presión en el contacto rodillo – material de trabajo durante el proceso. Durante el proceso se puede dar un patrón u otro dependiendo del grado de homogeneidad de la deformación provocada al material. Para cuantificar este grado de homogeneidad autores anteriores en la literatura [5] propusieron el parámetro H:

$$H = \frac{R}{t_0} \cdot r \quad (\text{Ecuación 2.3.1.1})$$

Donde:

- H es el parámetro del grado de homogeneidad.
- R es el radio del rodillo.
- t_0 es el espesor inicial.
- r es reducción de espesor. Definida mediante la expresión presentada en la **Ecuación 2.3.1.2.**

$$r = \frac{\Delta t}{t_0} \quad (\text{Ecuación 2.3.1.2})$$

El primer patrón diferenciado se produce cuando $H > 3$, cuando la deformación es homogénea, en el cual la distribución de presiones presenta un único máximo localizado en el punto neutro, como anteriormente se mostró en la **Figura 2.2.2. 2** y que se corresponde con la evolución predicha en teorías clásicas que permiten una estimación válida para las variables del proceso.

Sin embargo, cuando el parámetro del grado de homogeneidad $H < 3$, cuando la deformación es no homogénea, la distribución de presiones no presenta un solo máximo en el punto neutro como el patrón anterior. Según han probado resultados experimentales presentados en [6] en las distribuciones de presiones para estos casos se observan dos máximos, uno situado próximo a la entrada y el otro situado próximo a la salida, razón por la cual las teorías clásicas no resultarían aplicables y es necesario el uso de modelos numéricos.

En este artículo se intenta ahondar en este segundo caso en el que la deformación es no homogénea. Para ello han desarrollado un modelo 2D del conjunto rodillo – lámina mediante el software comercial Abaqus, bajo las hipótesis de deformación plana y grandes deformaciones.

Han propuesto la laminación de una lámina de 20 mm de espesor inicial mediante unos rodillos de 70 mm de radio a una velocidad de 30 rpm, los cuales se consideran deformables y suponiendo la laminación como un proceso cuasi estático.

El material laminado ha sido la aleación de aluminio – manganeso AA 3004 H-19, para el cual se ha supuesto un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento isotrópico.

Debido a que el artículo se encuentra en publicado en revistas de importancia contrastada y en una fecha relativamente actual, cumpliendo los requisitos propuestos en la búsqueda de artículos de los que extraer información, sumado al éxito conseguido en sus resultados, se van a considerar válidos dichos resultados y la simplificaciones realizados por los autores. Por lo que se va emplear el artículo presentado para su reproducción en el presente trabajo de fin de grado, con el propósito de obtener resultados semejantes.

Capítulo 3

3. ANÁLISIS NUMÉRICO DEL PROCESO DE LAMINACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN.

En la caracterización del proceso de laminación anteriormente descrito, se busca reproducir lo más fielmente posible el proceso, para obtener información muy cercana a la realidad sin necesidad de realizar ensayos experimentales, mediante modelos numéricos o analíticos, con el objetivo de conseguir un ahorro en tiempo y dinero.

Un modelo numérico permite resolver las ecuaciones de un modelo matemático mediante iteraciones y simplificaciones, con el consiguiente ahorro computacional.

En la simulación de problemas científicos y de ingeniería, el modelo numérico utilizado es el método de los elementos finitos. En este estudio, se ha utilizado el código numérico ABAQUS, se trata de uno de los programas de simulación de FEM más utilizados y potentes que se encuentran en la actualidad.

ABAQUS posee dos motores de simulación FEM para hacer uso de cada uno de ellos según lo indiquen las necesidades del problema: *ABAQUS/Standard*, para problemas formulados de forma implícita; y *ABAQUS/Explicit*, para problemas en forma explícita. Para completar satisfactoriamente este trabajo, el motor utilizado ha sido ABAQUS/Standard, con el propósito de dividir cada paso del problema en incrementos de tiempo e ir obteniendo información de cada uno de ellos.

3.2 DEFINICIÓN DEL MODELO.

Se incluye el modelo de elementos finitos que se ha empleado para simular el proceso de laminación, es decir, descripción de la geometría de las partes que componen el problema, su colocación en el plano y la relación existente entre ellas, condiciones de contorno y cargas aplicadas, tipo de procesado, así como, el tipo de mallado.

En primer lugar, hay que crear las partes de las que consta el modelo definiendo su geometría. El proceso de laminación presenta simetría geométrica respecto de la línea media del espesor del material laminado, por lo que únicamente se modela un rodillo y la lámina con la mitad de su espesor real. Ambas se definen como elementos sólidos deformables 2D, cuyas dimensiones se presentan a continuación:

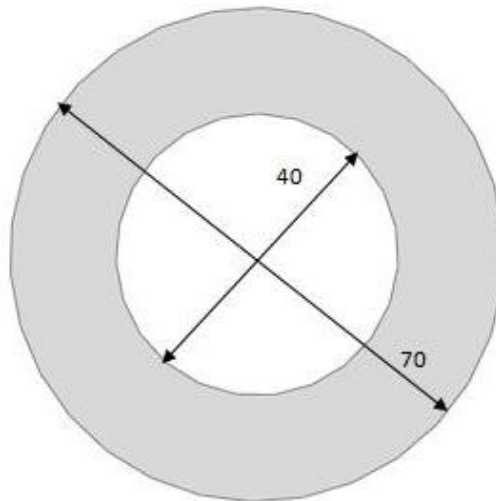


Figura 3.2. 1 – Dimensiones del rodillo.

Para reducir el área del modelo, el centro del rodillo se ha considerado rígido, por lo que su representación se ha simplificado a una corona circular de 30 mm de espesor.

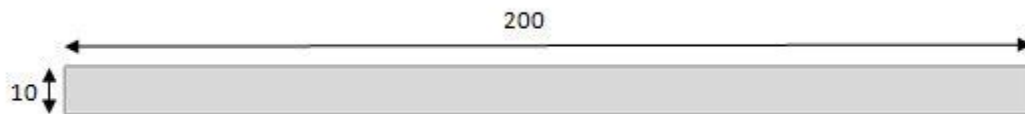


Figura 3.2.2 – Dimensiones de la lámina.

Ambas partes deben estar correctamente situadas en el plano. El rodillo no puede estar en contacto con la lámina en el instante $t=0$ segundos, por lo que el vértice superior derecho se ha situado a una distancia de 40 mm en el eje X del centro de coordenadas, distancia suficiente como para que cuando lámina y rodillo entren en contacto, el rodillo mantenga su velocidad de giro constante. En cambio, el centro del rodillo se sitúa a la distancia en el eje Y adecuada dependiendo del grado de reducción requerido, teniendo en cuenta que sólo se simula la mitad del proceso dada la simetría del conjunto. El aspecto final del modelo es el que se muestra en la siguiente figura:

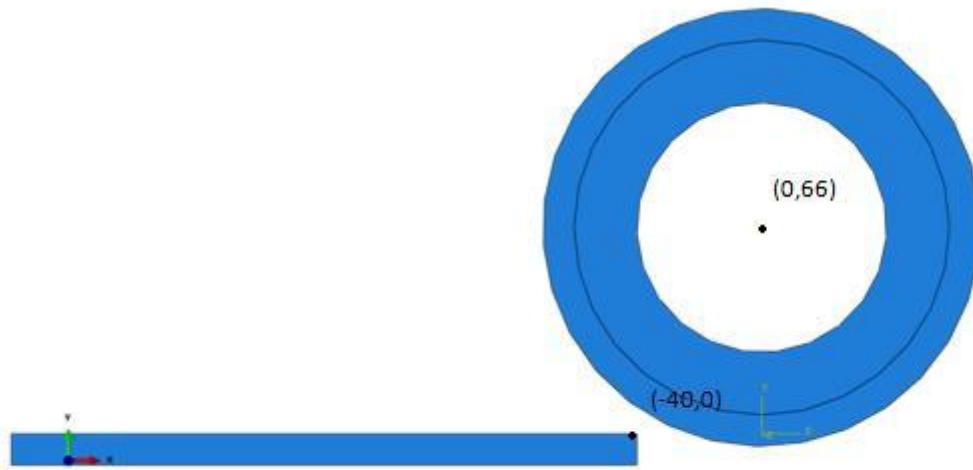


Figura 3.2. 3 – Imagen del conjunto lámina – rodillo para una reducción del 40 %.

El tipo de análisis elegido, se define en el módulo *step* de Abaqus, en él se pueden definir tantos *step* del estudio como sean necesarios. En este estudio, es necesario añadir dos *step* más posteriores al *step* inicial creado por defecto. Ambos *step* añadidos son de tipo *standard* como se ha explicado al principio del apartado. El primero de ellos de duración 0.1 segundos, en el que lámina y rodillo se encuentran en movimiento hasta que ambos entran en contacto, en este preciso momento comienza el segundo *step* del problema añadido, de duración 1.4 segundos, en el que únicamente el giro del rodillo y el rozamiento lámina-rodillo, la lámina va pasando por el rodillo hasta completar la deformación en toda su longitud.

Para simular el contacto que existiría en el proceso de laminación, se impone un contacto *surface-to-surface* entre la superficie exterior del rodillo y la cara superior de la lámina. Este contacto, será definido como un *hard contact*, de modo que no se permite el despegue de las superficies una vez que han entrado en contacto y un comportamiento tangencial en el cual se incluye un coeficiente de rozamiento de $\mu = 0.3$. Además, para conseguir que el rodillo gire sobre su centro será necesario definir una restricción del tipo *coupling*, con las que se consigue que el conjunto de nodos que componen la circunferencias de la corona circular se acoplen al movimiento del centro del rodillo.

Es necesario definir las condiciones de contorno del problema. En este caso, se tiene que hacer girar el rodillo, impidiendo en su centro los desplazamientos verticales y horizontales e imponiendo la velocidad de giro indicada en [4], $\omega = 30 \text{ rpm} = 3.1416 \frac{\text{rad}}{\text{seg}}$, esta condición de contorno debe de estar activada en los dos *step* anteriormente añadidos en nuestro problema. También se hace avanzar la lámina, aunque la velocidad de la lámina no va a afectar a nuestro estudio puesto que únicamente va a estar activa en el primero de los *step* añadidos (hasta que lámina y rodillo entran en contacto), se ha querido guardar la siguiente relación entre velocidad de giro del rodillo y velocidad de avance de la lámina:

$$v = \omega \times r = 3.1416 \frac{\text{rad}}{\text{seg}} \times 70 \text{ mm} = 219.916 \frac{\text{mm}}{\text{seg}} \quad (\text{Ecuación 3.2.1})$$

Donde:

- v es la velocidad de avance de la lámina (en dirección eje x negativo).
- ω es la velocidad de giro del rodillo (dirección eje z, sentido horario).
- r es el radio exterior del rodillo.

Además, para simular la simetría se impide el desplazamiento del borde inferior de la lámina, excepto en el eje X, recordando que este es en realidad la línea de simetría del modelo.

Uno de los pasos más importantes en la definición del modelo, es elegir un mallado adecuado que permita resolver el problema con el mayor grado posible de aproximación a la realidad. Por ello habrá que utilizar una malla más fina en aquellas zonas donde se prevean altas concentraciones de tensiones, grandes variaciones en las variables de estudio o cambios bruscos en la geometría.

El tipo de mallado del rodillo se ha dividido en dos zonas mediante una partición circular con concéntrica al rodillo y radio 60 mm, de modo que la zona exterior de la corona circular reproduzca lo mejor posible la geometría real para que el contacto sea como se ha ideado. La justificación de la elección de este tipo de mallado es la reducción del coste computacional al no haber mallado la totalidad del rodillo con la malla más fina.

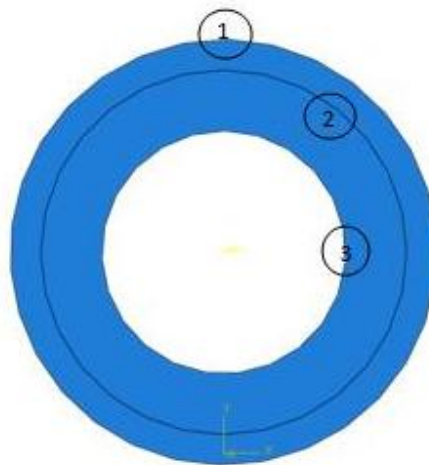


Figura 3.2. 4 – Detalle de la partición realizada al rodillo en el modelo numérico.

Con dicha partición, el mallado del rodillo consiste en una división de la circunferencia 1 en 293 elementos de tamaño aproximado 1.5 mm, la circunferencia 2 en 70 elementos de tamaño

aproximado 5.38 mm y la circunferencia 3 en 20 elementos de tamaño aproximado 12.56 mm. Han sido seleccionados elementos cuadriláteros tipo CPS4R y elementos triangulares tipo CPS3. Con el objetivo de crear un rodillo que produzca una reducción lo más uniforme posible, se busca un mallado de tipo free, lo que ha provocado el cambio de tipo de elementos empleados descrito anteriormente. El aspecto del rodillo mallado es el que se presenta a continuación:

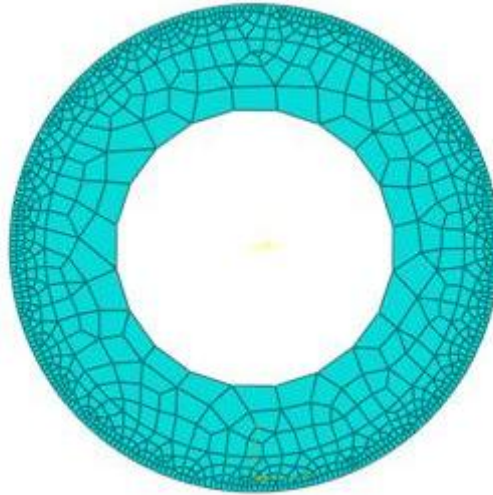


Figura 3.2.5 – Detalle del mallado final del rodillo.

Por último habrá que mallar la lámina. Para elegir el mallado más apropiado para la lámina habrá que realizar un análisis de sensibilidad de malla, dado que la geometría es simplemente un rectángulo de 10 x 200 mm y por muy grande que sea el tamaño de elemento escogido para mallar la lámina la geometría resultante será fiel a la realidad pero los resultados obtenidos variarán considerablemente.

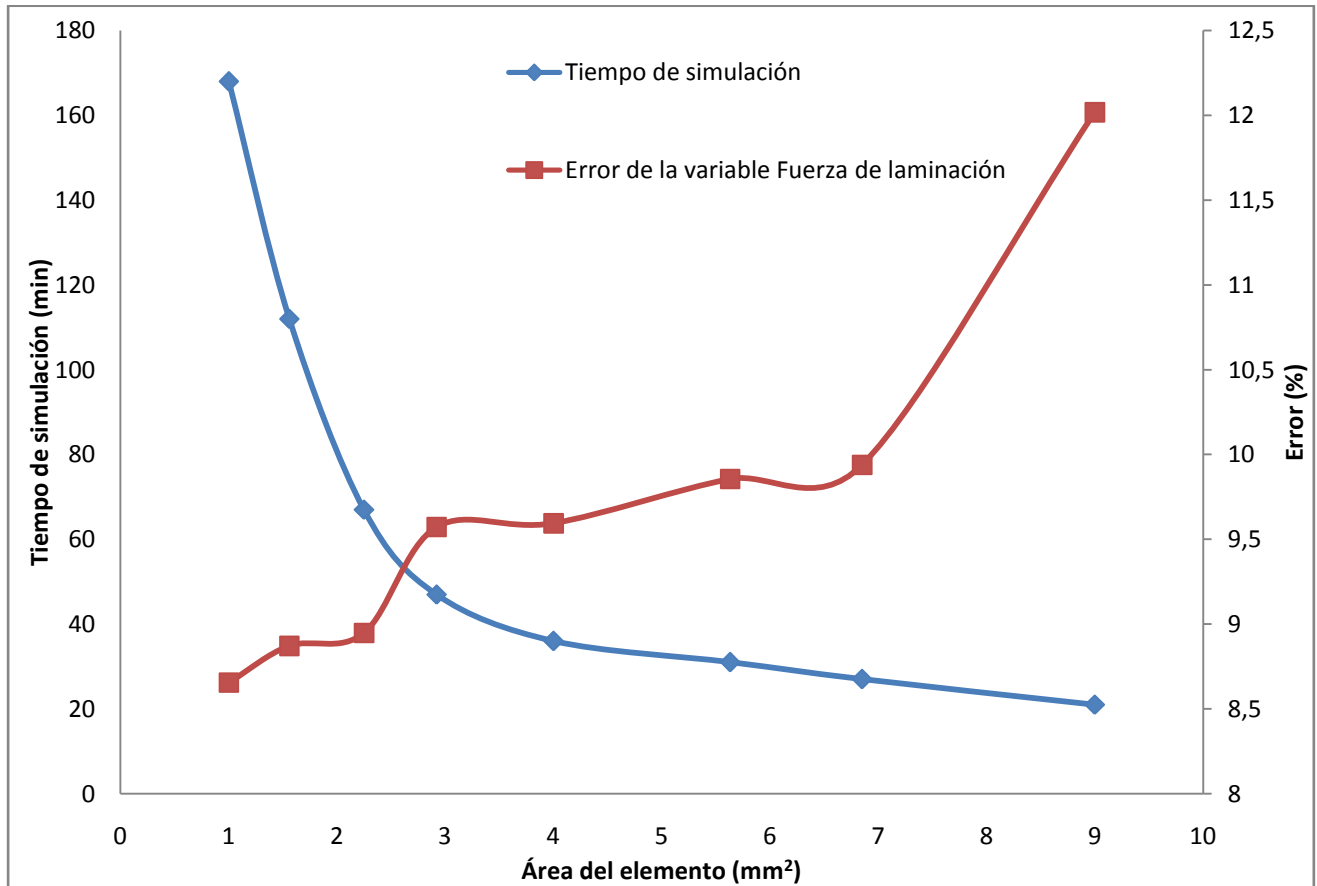
El análisis de sensibilidad de malla consiste en comparar los resultados de la fuerza de laminación obtenidos en las pruebas realizadas para distintas áreas de elemento que componen la malla de la lámina con los resultados presentados en [4], escogiendo el tamaño de elemento que mejor relación error – gasto computacional guarde. El análisis se realizará para una reducción del 40% del espesor inicial, ya que el estudio ha sido realizado para reducciones del 10, 15, 20, 30 y 40 % de reducción y es de suponer que el mayor error cometido se dará para la mayor deformación.

Resultado	7000	(N/mm)
Error admisible	10%	
Resultado + Error	7700	(N/mm)

Tabla 3.2. 1 – Resultado obtenido para una reducción de espesor del 40 % en [4] y resultado admisible en este trabajo.

Como se observa en la **Tabla 3.2.1**, ha sido considerado un error máximo admisible del 10 % como adecuado, atendiendo al tipo de estudio que se va a llevar a cabo.

Con estos datos, el análisis de sensibilidad obtenido se muestra en la siguiente gráfica:



Gráfica 3.2. 1 –Resultados del análisis de sensibilidad del mallado de la lámina.

Como se observa en la **Gráfica 3.2. 1**, existe una franja entre las áreas de 3 y 5.6 mm² en las que el error permanece prácticamente constante mientras que el tiempo de simulación disminuye. Este hecho puede indicar una buena zona para seleccionar el área del elemento. Para los elementos de área 5.6 mm², el error obtenido es prácticamente del 10 % (el límite fijado como error máximo) por lo que se debe descartar este valor del área.

Los valores del área que se encuentran a la derecha de la franja descrita, quedan completamente descartados al superar con creces el error máximo fijado aunque se reduzca considerablemente el tiempo de simulación. A la izquierda de la franja, llama la atención el brusco descenso del error obtenido al reducir el área del elemento por debajo de los 2.25 mm², áreas en las que se produce un incremento casi exponencial del tiempo de simulación. Sin embargo, la diferencia de error entre el

área de 3 mm^2 y 2.25 mm^2 es de un 0.67 %, lo que hace que no compense incrementar el gasto computacional en 20 minutos.

Finalmente, se llega a la conclusión que el tamaño óptimo de los elementos en los que se divide la lámina son de área 4 mm^2 , por tanto, se utilizarán elementos de dimensiones $2 \times 2 \text{ mm}$. Esta elección es debida a que para elementos de 4 mm^2 se obtiene un error del **9.59 %**, inferior al error admisible, y un gasto computacional de **36 min** para completar el trabajo, siendo la mejor relación error – gasto computacional obtenida entre las pruebas realizadas.

Con elementos de dimensiones $2 \times 2 \text{ mm}$ y de tipo CPS4R, el mallado resultante es el siguiente:

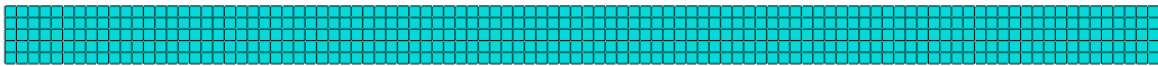


Figura 3.2. 6 – Detalle del mallado final de la lámina.

Finalmente, se obtiene un conjunto mallado constituido por 1444 elementos de tipo CPS4R y 59 elementos tipo CPS3, con un total de 1736 nodos.

3.3 DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES.

El siguiente paso a realizar es la definición de los materiales. Es imprescindible definir adecuadamente los materiales que van a ser utilizados en el modelo, debido a que las distintas propiedades de los materiales influyen directamente en los resultados obtenidos. Estos son definidos mediante la definición de su comportamiento elástico – plástico cuyos valores se obtienen de ensayos experimentales.

Para la realización del análisis numérico del proceso de laminación, han sido definidos dos materiales, uno para el rodillo y otro para la lámina sometida al proceso.

El material a laminar será el aluminio llamado AA 3004 H-19. Se trata de una aleación de aluminio deformado en frío donde el principal aleante es el manganeso, aunque también contiene magnesio, lo que provoca un aumento de su resistencia mecánica. La aleación de aluminio – manganeso 3004, tiene un uso muy extendido en el ámbito industrial. Por ejemplo es muy utilizado en la fabricación de calderas, equipo médico, latas o en el recubrimiento de fachadas.

Este va a ser definido atendiendo a su comportamiento elástico - plástico, introduciendo en Abaqus sus curvas tensión – deformación para distintas temperaturas, aunque en este primer estudio no se

va a tener en cuenta el efecto del incremento de temperatura. Se van a utilizar los datos obtenidos de [4].

El régimen elástico va a ser definido mediante la introducción del módulo de Young y el coeficiente de Poisson, presentados en la **Tabla 3.3. 1**:

AA 3004 H-19	
Propiedades mecánicas - Régimen elástico	
E (GPa)	ν
70	0,33

Tabla 3.3. 1 –Constantes elásticas para el AA 3004 – H19 [4].

En cambio, para definir el régimen elástico se emplean los datos presentados en la **Tabla 3.3 2**:

AA 3004 H-19			
Propiedades mecánicas - Régimen plástico			
Temperatura (°C)	K (MPa)	n	σ_{y0} (MPa)
20	292,07	0,03	245
50	290,77	0,031	242
100	287,96	0,033	237

Tabla 3.3. 2 – Constantes plásticas para el AA 3004 – H19 [4].

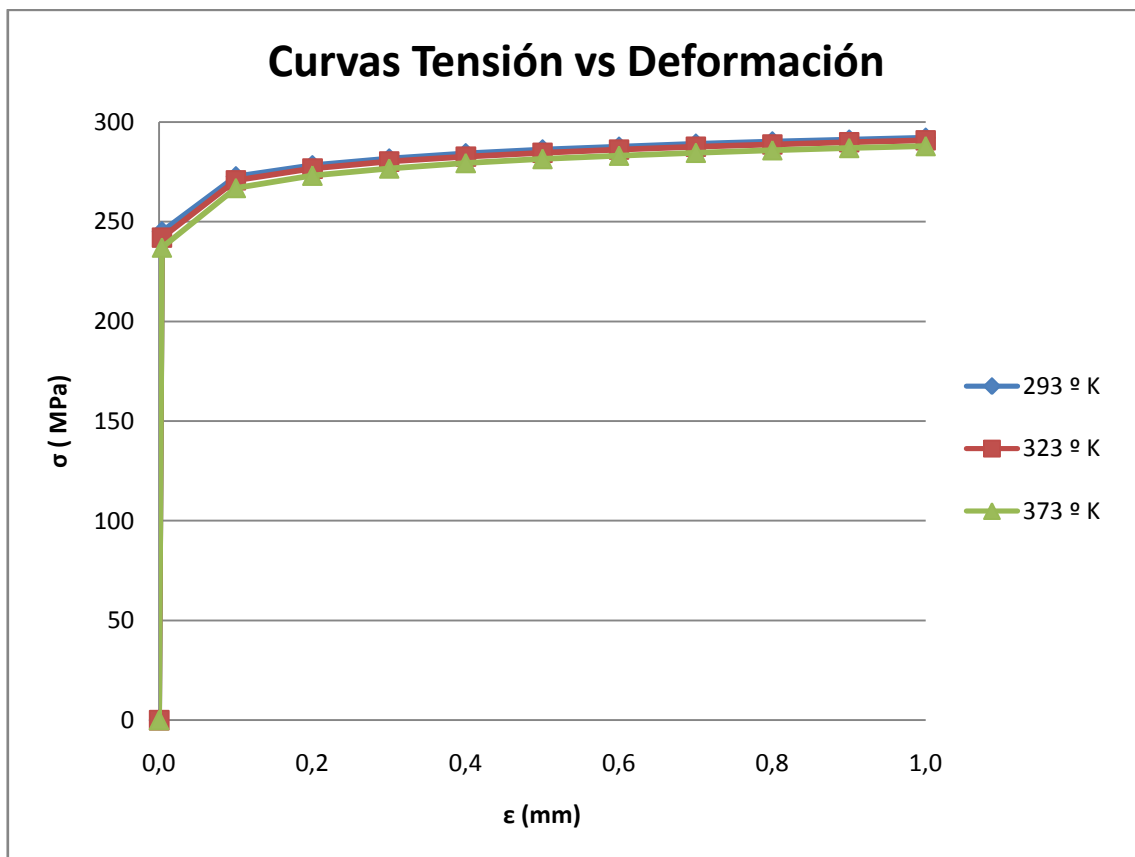
Además, se dispone de la ecuación que define la curva de fluencia. La curva de fluencia es generalmente válida como una relación que define el comportamiento plástico de un metal en el trabajo en frío, que nos permite relacionar esfuerzo con deformación.

$$\sigma = K (\varepsilon)^n \quad (\text{Ecuación 3.3. 1})$$

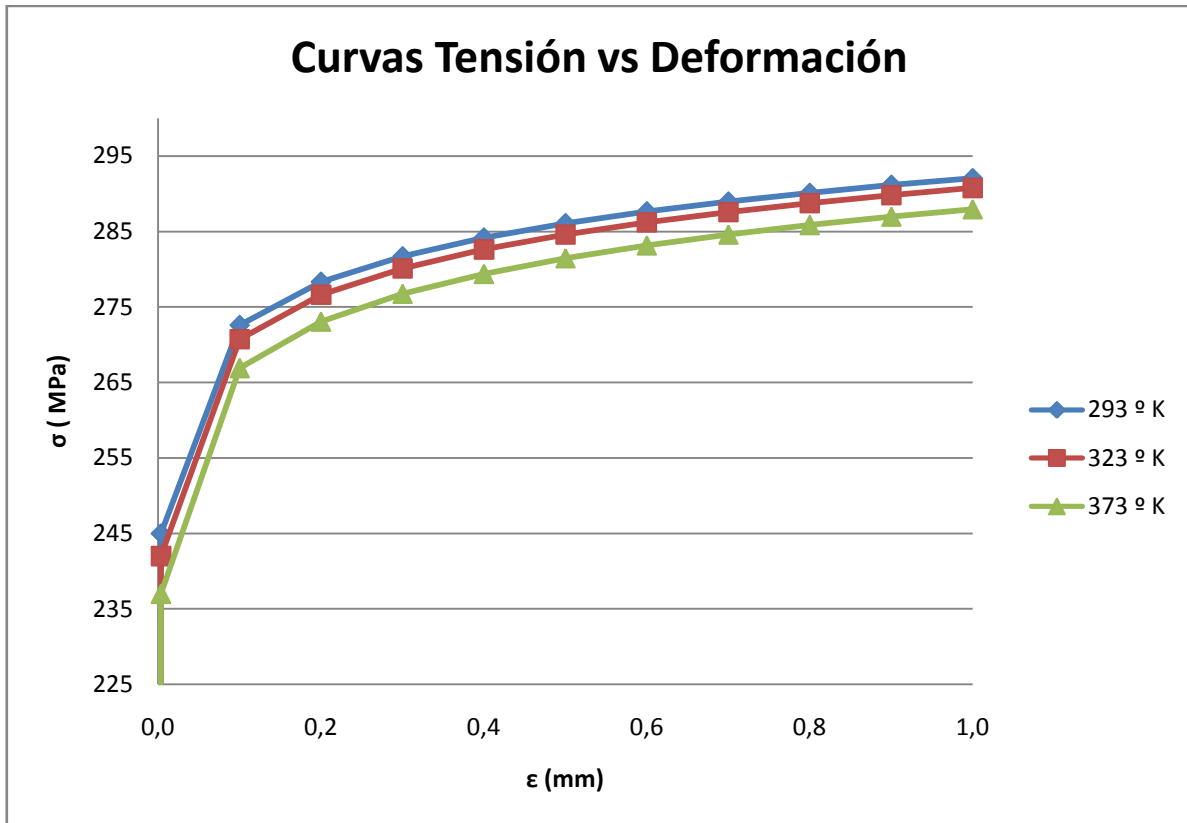
Donde:

- σ es el esfuerzo real.
- ε es la deformación real.
- K es el coeficiente de resistencia.
- n es el exponente de endurecimiento por deformación.

Gracias a la **Ecuación 3.3. 1** y a los datos presentados en la **Tabla 3.3. 1** y en la **Tabla 3.3. 2**, ya se dispone de las curvas tensión – deformación para introducir sus valores en Abaqus mediante la tabulación de valores de deformación.



Gráfica 3.3. 1 – Curvas tensión – deformación para el AA 3004 H-19.



Gráfica 3.3. 2 – Detalle régimen plástico en las curvas tensión – deformación para el AA 3004 H-19.

Como se dice anteriormente, en este primer estudio no se tiene en cuenta el efecto del incremento de temperatura. A pesar de ello se van a introducir propiedades térmicas del AA 3004 H-19, tales como densidad, calor específico, coeficiente de conductividad térmica, coeficiente de dilatación y la fracción de calor producido por el trabajo plástico; que se presentan en la **Tabla 3.3. 3**, para dejar completamente definido el material.

AA 3004 H-19				
Propiedades térmicas				
ρ (Kg/m ³)	C_p (J/Kg K)	k (W/mK)	α (m/mK)	β
2700	893	162	$2,3 \cdot 10^{-5}$	0,95

Tabla 3.3. 3 – Propiedades térmicas para el AA 3004 H-19 [4].

Por último, falta por definir el material del que está compuesto el rodillo. El material elegido ha sido un acero al carbono sin alear. Se ha supuesto un comportamiento elástico lineal, por lo que sólo es necesario introducir las propiedades mecánicas del régimen elástico y las propiedades térmicas típicas para los aceros, que se pueden observar en la **Tabla 3.3.4**.

ACERO				
Propiedades mecánicas - Régimen elástico		Propiedades térmicas		
E (GPa)	ν	Cp (J/Kg K)	k (W/mK)	α (m/mK)
210	0,3	460,5	52	$1,2 \cdot 10^{-5}$

Tabla 3.3. 4 – Propiedades mecánicas y térmicas para el acero [4].

3.4 ALTERNATIVAS AL MODELO PRINCIPAL.

En este apartado, se explican varios modelos alternativos propuestos al principal anteriormente detallado. Estos nuevos modelos se realizan con la finalidad de mostrar distintas maneras de llevar a cabo una misma simulación según se tengan unas necesidades u otras. Los resultados de estos, podrán ser comparados con los obtenidos en el modelo principal y servirá para comprobar si las conclusiones a las que llevan cada uno de ellos tienen algo en común.

A continuación, se detallan los cambios llevados a cabo respecto al modelo principal para obtener cada una de las alternativas de modelo propuestas.

3.4.1 RODILLO TIPO WIRE.

Continuando en el ámbito de las 2 dimensiones, la reproducción de las partes como tipo *wire* o alambre, significa la mayor simplificación posible de las partes que componen el modelo. Esta simplificación conlleva una reducción importante en el número de elementos, lo que se reproduce en la disminución del gasto computacional de la simulación, pero en una pérdida de control sobre las variables.

En la simulación de un proceso de laminación únicamente cabe la posibilidad de reproducir el rodillo como *part* tipo *wire*, la lámina se mantiene como *part* tipo sólido deformable para poder observar la reducción de espesor llevada a cabo. Por tanto se va a sustituir el rodillo tipo sólido deformable de antes con forma de corona circular por un rodillo tipo *DiscreteRigid/Wire*, que consistirá únicamente de una circunferencia de 70 mm de radio, como se observa en la **Figura 3.4.1 1**.

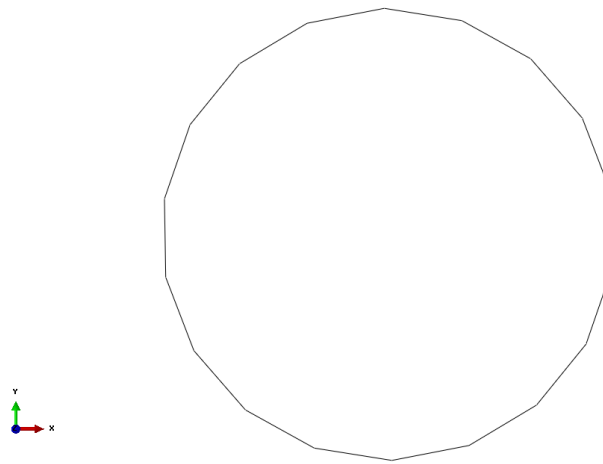


Figura 3.4.1. 1 – Imagen de rodillo tipo wire.

Una de las ventajas que conlleva la utilización de este rodillo tipo *wire* es que no es necesario asignarle ningún material, ya que este rodillo se considera simplemente un cable rígido que no tiene estado tensional.

Para la utilización de este tipo de rodillo es necesario crear una restricción tipo *Rigid Body*, para que el rodillo *wire* se considere indeformable. El resto de interacciones, restricciones y condiciones de contorno, se mantienen igual que en el estudio principal.

El mallado realizado a este nuevo modelo, sólo varía como ya se adelantó en el número de elementos asignados al rodillo tipo *wire*. El mallado consiste en la división de la circunferencia en 100 elementos tipo R2D2. En la **Figura 3.4.1. 2** se muestra el mallado resultante para todo el conjunto.

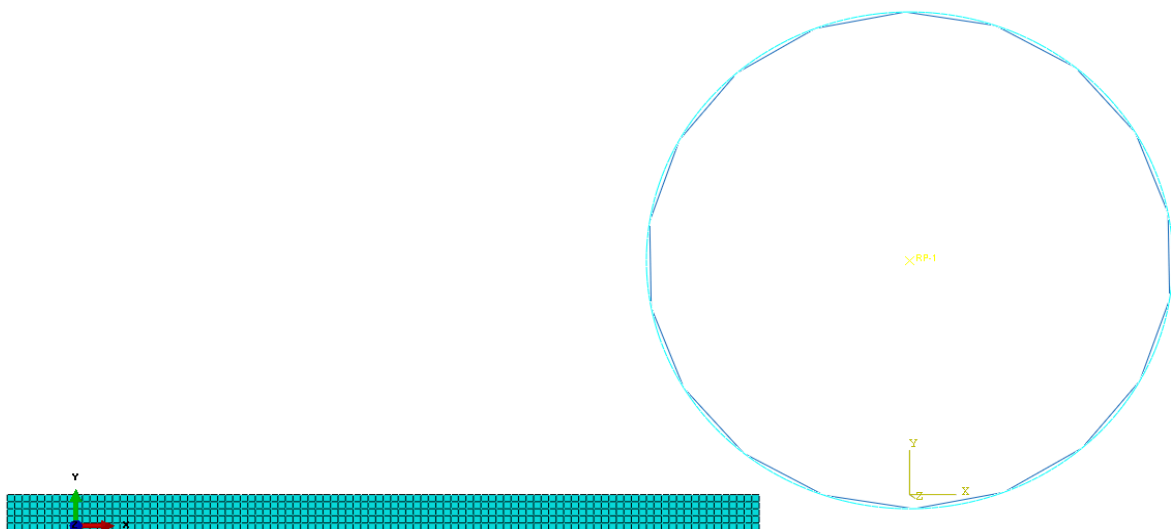


Figura 3.4.1. 2 – Detalle mallado final para el modelo con rodillo tipo wire.

Finalmente, se obtiene un conjunto mallado constituido por 500 elementos de tipo CPS4R y 220 elementos de tipo R2D2, con un total de 826 nodos, lo cual significa una reducción del 52.4 % en el número de nodos usados con el ahorro computacional que conlleva, como se ha visto al hacer el análisis de sensibilidad del mallado, a mayor número de elementos mayor tiempo de simulación.

3.4.2 INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA.

Esta segunda alternativa consiste en incluir al modelo principal un problema termo-mecánico. Este se ha acoplado de manera incremental, desde el instante en el que la lámina entra en contacto con el rodillo hasta alcanzar el régimen estacionario.

Para conseguir modelar la influencia de la variación térmica a partir del modelo inicial son necesarios una serie de cambios en el mismo.

El primero de ellos es la modificación del tipo de análisis definido en el módulo *step*. En el modelo principal desarrollado se definieron dos *step* posteriores al *step* inicial creado por defecto. El primero de duración 0.1 segundos, en el que la lámina y el rodillo se encuentran en movimiento hasta que ambos entran en contacto, en este preciso momento comienza el segundo *step* añadido, de duración 1.4 segundos, en el que únicamente se define el giro del rodillo, debido a que simplemente con este y el rozamiento lámina – rodillo, la lámina va pasando por el rodillo hasta completar su deformación en toda su longitud. A diferencia del modelo principal en el que ambos *step* añadidos eran de *tipo standard*, en la alternativa de modelo presentada se definirán estos como estados de tipo *coupled temp-displacement*.

Llegado el momento de definir el comportamiento del material laminado, existen varias maneras de lograrlo como se ha explicado anteriormente. En la presente alternativa de modelo la aleación de aluminio laminada, va a ser definida mediante una ecuación constitutiva.

Una ecuación constitutiva es una formulación físico-matemática que permite reproducir el comportamiento de un material, a través de la determinación de la tensión en función de distintas variables como pueden ser deformación, velocidad de deformación y temperatura entre otras.

La elección de utilizar una ecuación constitutiva, ha sido tomada para representar más fielmente el comportamiento plástico del material en condiciones termo-mecánicas, logrando de este modo la influencia de la variación térmica ansiada.

De entre los distintos modelos de ecuaciones constitutivas que presenta Abaqus, se va a utilizar el modelo mecánico de Johnson-Cook. Dicho modelo permite definir cualquier material, especialmente metales, para simulaciones en las que sean afectados simultáneamente por la deformación y por la temperatura, por lo que satisface las necesidades descritas.

De esta manera el modelo de Johnson-Cook se define mediante la siguiente ecuación.

$$\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}_p, \dot{\bar{\varepsilon}}_p, T) = [A + B(\bar{\varepsilon}_p)^n] \left[1 + C \ln \left(\frac{\dot{\bar{\varepsilon}}_p}{\dot{\bar{\varepsilon}}_0} \right) \right] [1 - T_H^m] \quad (\text{Ecuación 3.4.2.1})$$

Donde:

- $\bar{\varepsilon}_p$ es la deformación plástica efectiva.
- $\dot{\bar{\varepsilon}}_p$ es la velocidad de deformación.
- $\dot{\bar{\varepsilon}}_0$ es la velocidad de deformación de referencia.
- T_H es una temperatura característica del material que se obtiene de la expresión:

$$T_H = \frac{T - T_0}{T_m - T_0} \quad (\text{Ecuación 3.4.2.2})$$

Donde:

- T_m es la temperatura de fusión del material.
- T_0 es la temperatura ambiente.
- T es la temperatura a la que se encuentra el material.
- A, B, C, n y m son características del material obtenidas experimentalmente, y que han sido halladas en la literatura [7].

A continuación, en la **Tabla 3.4.2. 1** se presentan las constantes empleadas para la definición del comportamiento termo-plástico del material usado mediante la ecuación constitutiva de Johnson – Cook.

Constantes ecuación Johnson - Cook para el AA 3004 H-19					
A (MPa)	B (MPa)	n (-)	m (-)	C (-)	$\dot{\varepsilon}_0$ (s ⁻¹)
127	282,55	0,44	2,09	0,083	2000

Tabla 3.4.2. 1 – Constantes ecuación Johnson – Cook para el AA 3004 H-19 [7].

Una vez hemos hallado el valor de dichos parámetros y junto a las características del problema queda definida la ecuación constitutiva de Johnson-Cook para la aleación de aluminio-manganeso empleada, AA 3004 H-19, a falta de definir el valor de T_H .

Para el caso de estudio el parámetro T_H se va anular, puesto que la temperatura a la que se encuentra el material en el proceso de laminación en frío se ha supuesto igual a la temperatura ambiente. Bajo esta suposición y haciendo uso de la **Ecuación 3.4.3. 2**, Se obtiene como resultado la anulación del parámetro T_H de la ecuación resultante.

De esta manera queda definida la ecuación constitutiva de Johnson-Cook para el material AA 3004 H-19.

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p, \dot{\bar{\epsilon}}_p) = \left[127 + 282.55(\bar{\epsilon}_p)^{0.44} \right] \left[1 + 0.083 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{2000} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 3.4.2.3})$$

Una vez definido el comportamiento termoplástico del material, unido a la definición tanto del comportamiento elástico como de sus propiedades térmicas, que permanecen igual que en el modelo principal, queda definido por completo el comportamiento del material escogido. Igualmente no es necesario redefinir el comportamiento del material escogido para el rodillo, el acero.

En cuanto a las interacciones y condiciones de contorno definidas para el modelo principal, permanecerán de igual manera en la presente alternativa. Además es necesaria la creación de una nueva condición de contorno. Habrá que crear una condición *Pdefined Field*, de esta manera se asigna al conjunto la temperatura inicial que se desee, en este caso será de 293 K. Con el objetivo de que mediante la labor del tipo de estado definido anteriormente esta varíe según se vaya produciendo la laminación debido al aumento de temperatura derivado de la fricción del contacto lámina – rodillo.

Es imprescindible para que ocurra esto cambiar el tipo de elementos utilizados para el mallado. Deben ser utilizados elementos lineales en desplazamiento y temperatura, en este caso se han vuelto a utilizar elementos cuadriláteros de 4 nodos. Este tipo de elemento es conocido en Abaqus como elementos tipo CPE4T.

Con los cambios descritos ya estaría incluido el problema termo – mecánico en el nuevo modelo, se puede comprobar definiendo como salida de campo o *Field output* la variable temperatura (TEMP). Este tipo de salida de variables almacena los valores de esta en todos los elementos del modelo, de manera que después cabe la posibilidad de observar la distribución geométrica de los valores de dichas variables.

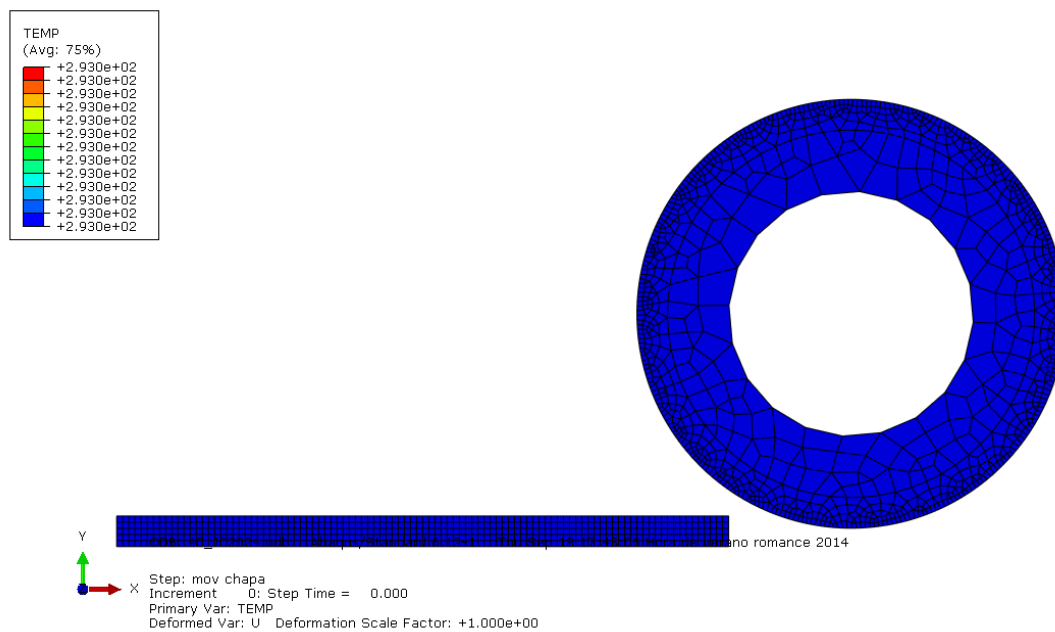


Figura 3.4.2. 1 – Distribución geométrica de los valores de la variable temperatura en el instante inicial, para una reducción de espesor del 40 %.

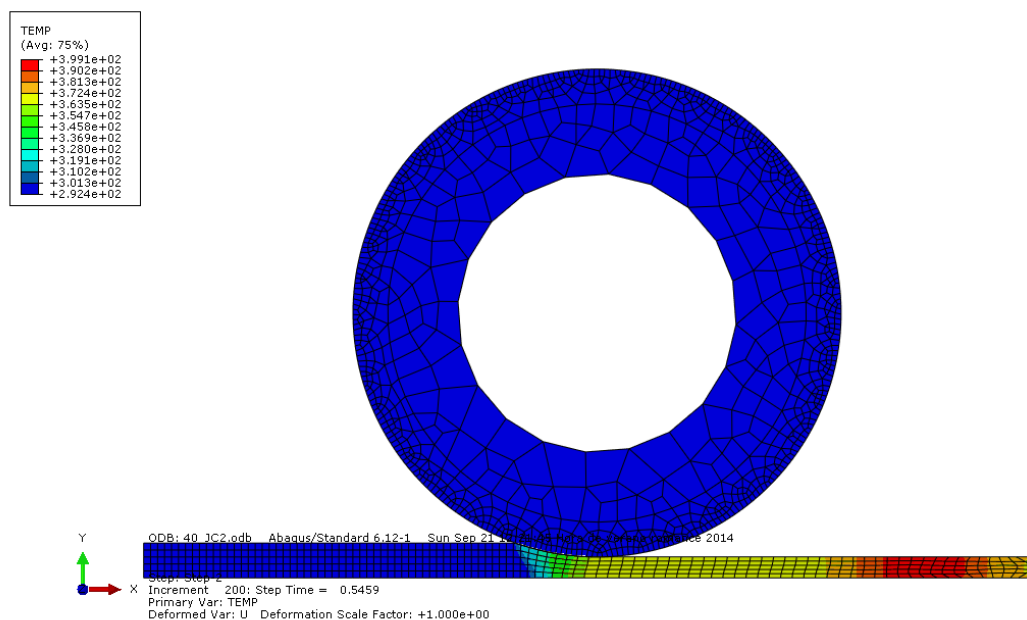


Figura 3.4.2. 2 – Distribución geométrica de los valores de la variable temperatura cuando se está produciendo la deformación, para una reducción de espesor del 40 %.

3.4.3 CAMBIO EN LA ELECCIÓN DEL MATERIAL SOMETIDO AL PROCESO DE LAMINACIÓN.

La última de las alternativas al modelo desarrollado propuestas en el presente Trabajo de Fin de Grado, únicamente se va modificar respecto de la alternativa presentada en el **apartado 3.4.2**, el material escogido para ser sometido al proceso de laminado plano.

El material escogido para la realización de este último estudio es la aleación de aluminio – cobre AA 2024 con el tratamiento térmico T-351. Se trata de una de las aleaciones más utilizadas en el sector aeronáutico para la fabricación de fuselajes, aprovechando su alta resistencia y baja densidad. Casi siempre es empleado en espesores delgados que no exceden de los 2 mm, por lo que es interesante estudiar su comportamiento al ser sometido a un proceso de laminado plano en frío.

Para su definición dentro del modelo Abaqus, se han obtenido sus propiedades en la literatura científica [8] [9].

A continuación en la **Tabla 3.4.3. 1**, **Tabla 3.4.3. 2** y **Tabla 3.4.3. 3** se presentan los parámetros de referencia que definen el material empleado en las simulaciones.

AA 2024 T-351	
Propiedades mecánicas - Régimen elástico	
E (Gpa)	ν
74,66	0,3

Tabla 3.4.3. 1 – Constantes elásticas para el AA 2024 T-351 [9].

AA 2024 T-351			
Propiedades térmicas			
ρ (Kg/m ³)	Cp(J/Kg K)	k (W/mK)	β
2700	875	162	0,95

Tabla 3.4.3. 2 – Propiedades térmicas para el AA 2024 T-351 [9].

El comportamiento termo-plástico del material en este caso volverá a ser definido mediante la ecuación constitutiva de Johnson – Cook.

Constantes ecuación Johnson - Cook para el AA 2024 T-351

A (MPa)	B (MPa)	n (-)	m (-)	C (-)	$\dot{\epsilon}_0$ (s ⁻¹)
352	440	0,42	1.7	0,0083	3.33 10 ⁻⁴

Tabla 3.4.3. 3 – Constantes ecuación Johnson – Cook para el AA 2024 T-351 [9].

Con ello, y las condiciones de temperatura que no varían respecto del apartado anterior, queda definida la ecuación constitutiva de Johnson-Cook para el material AA 2024 T-351.

$$\bar{\sigma}(\bar{\epsilon}_p, \dot{\bar{\epsilon}}_p) = \left[352 + 440(\bar{\epsilon}_p)^{0.42} \right] \left[1 + 0.0083 \ln \left(\frac{\dot{\bar{\epsilon}}_p}{3.33 \cdot 10^{-4}} \right) \right] \quad (\text{Ecuación 3.4.3.1})$$

3.5 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO.

Es el momento de comprobar si los resultados obtenidos por el modelo numérico utilizado son fieles a la realidad, esto hecho se conoce como validación del modelo numérico.

Se encuentran distintas maneras de validar un modelo numérico, se puede validar mediante la comparación de resultados de una de las variables del nuevo modelo, con los resultados obtenidos en modelos anteriormente validados por otros autores, con datos tomados experimentalmente o analíticamente.

En este trabajo de fin de grado se va a proceder a la validación del modelo numérico en términos de la fuerza de laminación y del par generado. Para ello se han realizado varias simulaciones del modelo propuesto en las que se ha variado el porcentaje de reducción deseado para la lámina. Se han realizado simulaciones para el 10, 15, 20, 30 y 40 % con el objetivo de comparar sus resultados con los mostrados en la literatura [4] y los obtenidos analíticamente de las expresiones encontradas en libros de texto [10] y [3].

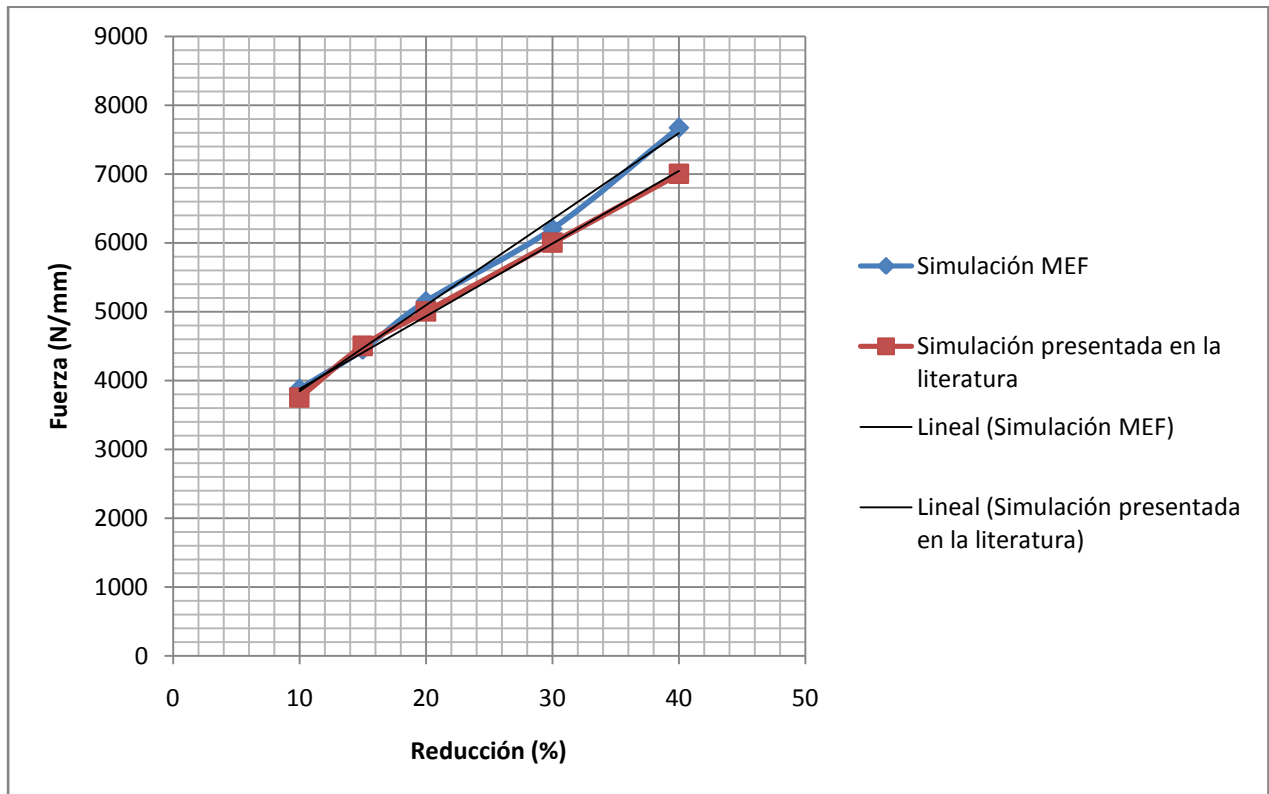
En la **Tabla 3.5. 1** se puede observar como los datos de fuerza de laminación obtenidos del modelo de MEF presentado en este trabajo, cumple el requisito para su validación de no superar el 10 % de error en ninguno de sus resultados tomados.

Resultados					
Reducción (%)	10	15	20	30	40
Fuerza (N/mm)	3750	4500	5000	6000	7000
Fuerza obtenida (N/mm)	3876,63	4445,72	5148,35	6203,84	7671,64
Error (%)	3,38	1,21	2,97	3,40	9,59

Tabla 3.5. 1 – Fuerza de laminación obtenida y presentada en la literatura [4].

A la vista de los resultados y como ya se adelantó anteriormente, se puede comprobar como para la mayor reducción realizada el modelo presentado tiene un error del 9.59 %, un dato que podría llevar a pensar que el modelo no es todo lo fiable que debería en términos de fuerza de laminación, ya que está rozando el máximo error admisible, pero en el resto de simulaciones realizadas este se reduce considerablemente llegando finalmente a un error medio del 4.11 %.

En la **Gráfica 3.5. 1** se presentan las progresiones lineales de ambos modelos:



Gráfica 3.5. 1 – Comparativa entre fuerza de laminación obtenida y presentada en la literatura [4].

Como se puede ver en las progresiones lineales de ambos modelos, se puede decir que el modelo desarrollado se adapta bastante bien al modelo propuesto en [4].

Finalmente y con fines meramente ilustrativos, puesto que el modelo ya ha quedado validado en términos de fuerza de laminación, se procede a comparar los resultados de ambos modelos con resultados de fuerza de laminación estimados analíticamente mediante las expresiones encontradas en [10] y [3].

Dichas expresiones se presentan a continuación:

$$F = \bar{Y}_f \omega L \quad (\text{Ecuación 3.5.1})$$

Donde:

- F es la fuerza de laminación.
- \bar{Y}_f es el esfuerzo de fluencia promedio. Definido mediante la **Ecuación 3.5. 2**.
- ω es la velocidad angular del rodillo.
- L es la longitud de contacto rodillo-lámina. Definida mediante la **Ecuación 3.5. 3**.

$$\bar{Y}_f = \frac{K \epsilon^n}{1 + n} \quad (\text{Ecuación 3.5.2})$$

Donde:

- ϵ es el esfuerzo real experimentado. Definido mediante la **Ecuación 3.5. 4**.
- K y n definen la curva de fluencia del material laminado.

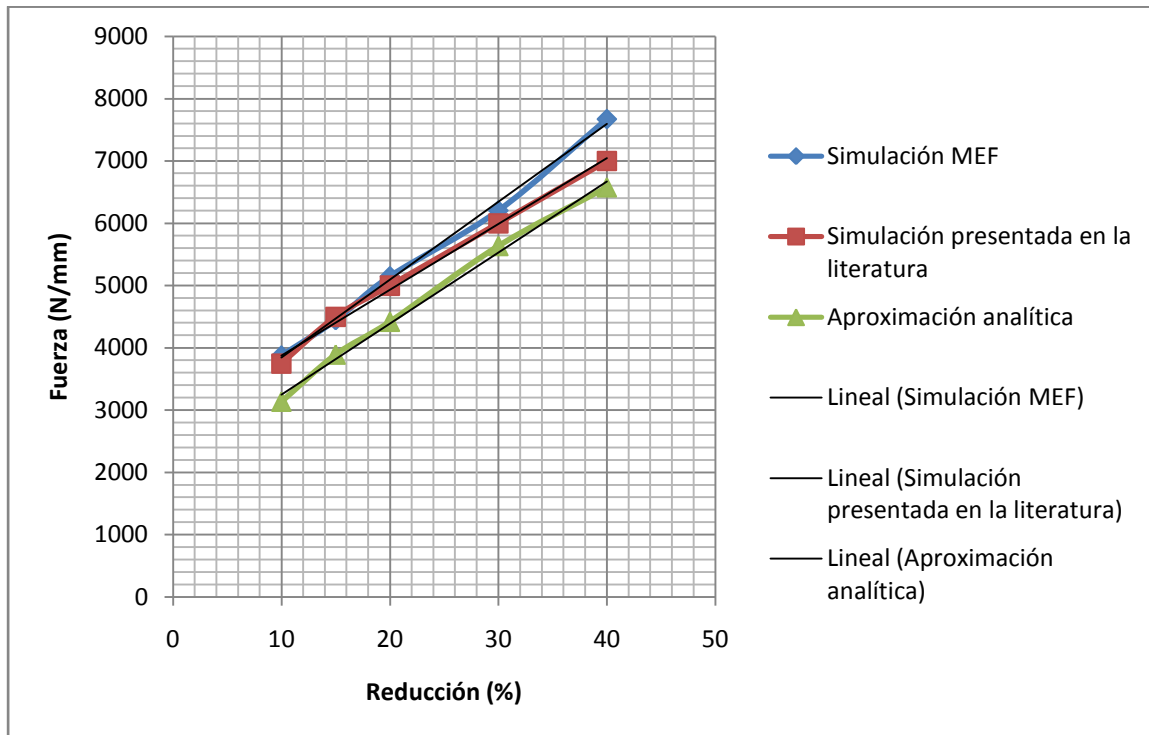
$$L = \sqrt{R (t_0 - t_f)} \quad (\text{Ecuación 3.5.3})$$

Donde:

- R es el radio del rodillo.
- t_0 es el espesor inicial de la lámina.
- t_f es el espesor final de la lámina.

$$\epsilon = \ln \frac{t_0}{t_f} \quad (\text{Ecuación 3.5.4})$$

En la **Gráfica 3.5. 2** quedan presentada la comparativa propuesta:



Gráfica 3.5. 2 – Fuerza de laminación obtenida en el modelo desarrollado, en el modelo presentado en [4] y estimada analíticamente.

En la gráfica anterior se observa como la aproximación analítica realizada comete un error ciertamente admisible respecto a la progresión lineal de ambos modelos para las menores reducciones propuestas. Mientras que para las mayores reducciones, la aproximación analítica comete un error relativamente constante e incluso disminuye para la progresión del modelo presentado en [4], pero el error aumenta respecto a los resultados obtenidos mediante el modelo propuesto en este trabajo de fin de grado. Este hecho puede ser debido a que las expresiones que han sido utilizadas para realizar la aproximación analítica no son las expresiones adecuadas para este caso de laminación en frío en concreto o que simplemente se trata de la variación normal para la comparativa entre estudios analíticos y estudios realizados por el método de los elementos finitos.

Por otro lado, en la **Tabla 3.5. 2** quedan reflejados los resultados de par de laminación obtenidos por medio de las fuerzas de laminación del modelo desarrollado presentadas en la **Tabla 3.5. 1** y la **Ecuación 3.5. 5** encontrada en [3].

$$T = 0.5 F L \quad (\text{Ecuación 3.5.5})$$

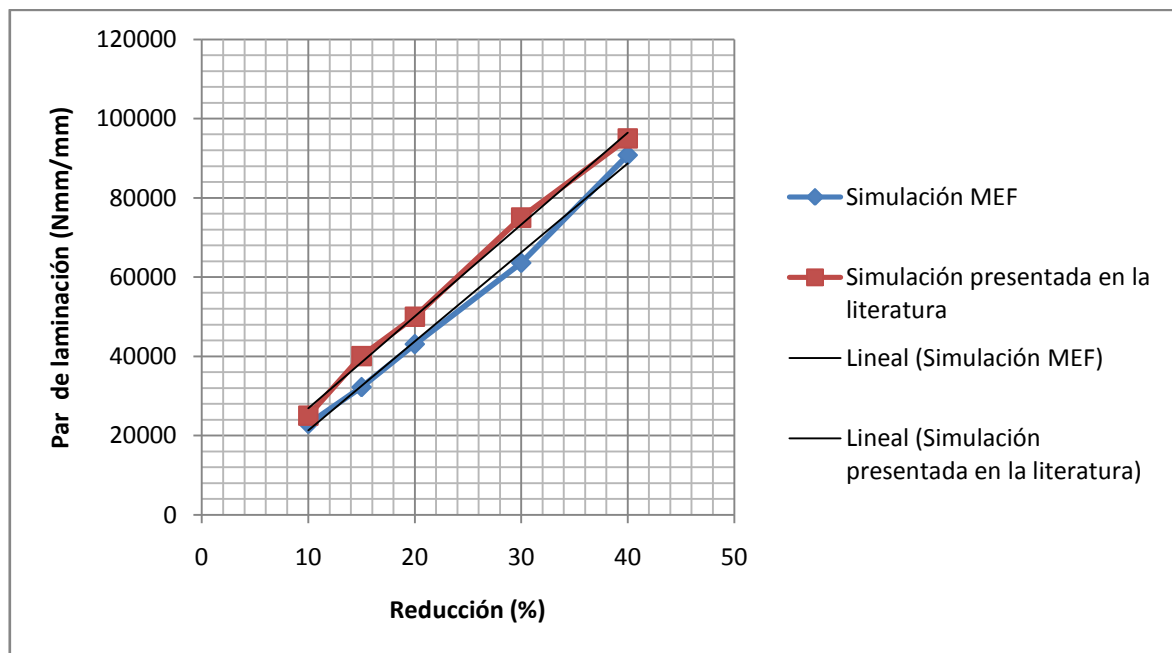
Donde:

- T es el par de laminación.
- F es la fuerza de laminación. Definida en la **Ecuación 3.5. 1.**
- L es la longitud de contacto rodillos lámina. Definida en la **Ecuación 3.5. 3.**

Resultados					
Reducción (%)	10	15	20	30	40
Par (Nmm/mm)	25000	40000	50000	75000	95000
Par obtenido (Nmm/mm)	22930	32212	43066	63571	90771
Error (%)	8,28	19,47	13,87	15,24	4,45

Tabla 3.5.2 – Par de laminación obtenida y presentada en la literatura [4].

En la **Gráfica 3.5.3** se presentan las progresiones lineales del par de laminación para ambos modelos.



Gráfica 3.5. 3 – Comparativa entre par de laminación obtenido y presentado en la literatura [4].

Se puede observar como en tres de las cinco reducciones estudiadas, el error supera el error máximo del 10 %, quedando un error medio del 12.26 %. Este aumento del error medio respecto del error medio resultante del estudio de la variable fuerza de laminación, es provocado por la obtención de peores resultados, especialmente para las reducciones del 15, 20 y 30 %. Estos resultados se pueden deber a que para obtener el par de laminación se arrastra el error obtenido en los resultados de la fuerza de laminación, más el error propio de la expresión analítica del par de laminación.

Capítulo 4

4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

Una vez que se han obtenidos datos del modelo desarrollado, a la vista de los cuales se puede afirmar que el modelo queda validado y se han realizado las modificaciones pertinentes para llevar a cabo las alternativas al modelo propuestas, se muestran algunos de los resultados que han sido estudiados, la comparación entre las alternativas al modelo principal y las conclusiones que se extraen de ellos.

4.1 ANÁLISIS DEL MODELO PRINCIPAL.

Uno de los objetivos del presente Trabajo de Fin de Grado es estudiar la evolución de las tensiones residuales que aparecen en la superficie del material una vez sometido al proceso de laminación.

Estudios disponibles en la literatura científica han demostrado la existencia de dos patrones de comportamiento de las distribuciones de presión en el contacto rodillo - material durante la laminación plana, dependiendo del grado de homogeneidad de la deformación inducida en el material [9-10] [11-12], como se vio anteriormente este grado de homogeneidad puede cuantificarse mediante el parámetro H .

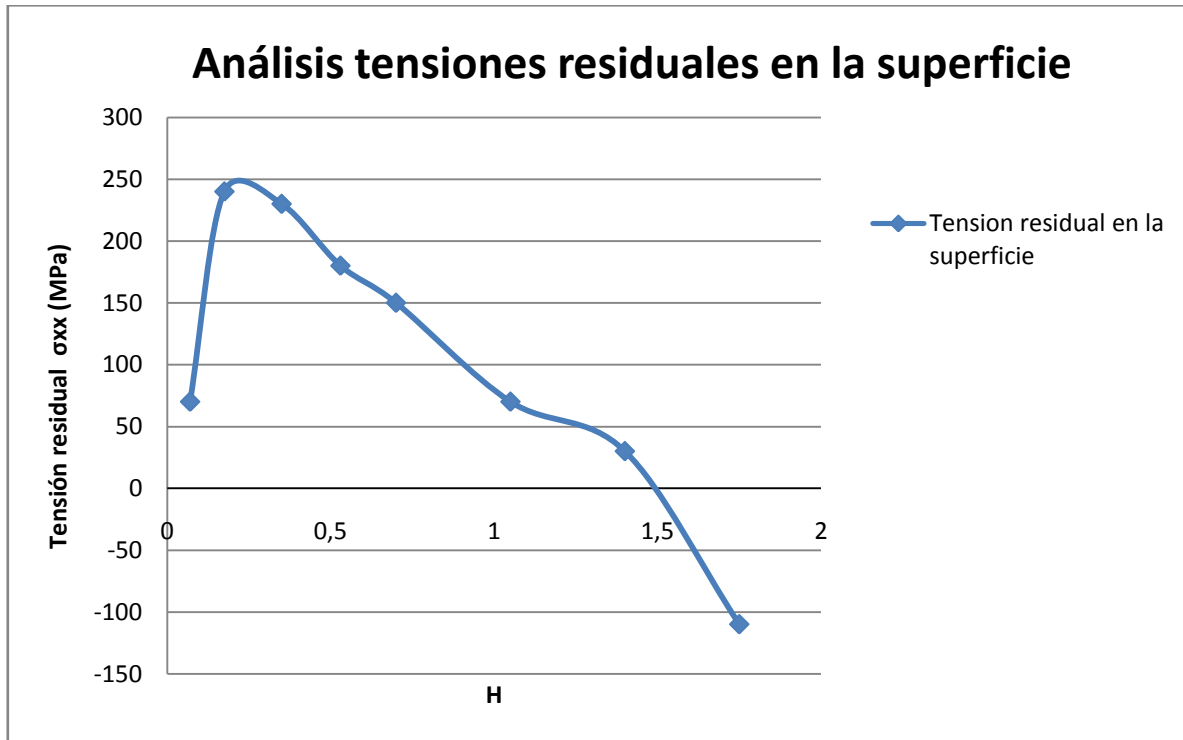
Cuando $H > 3$, es decir, la deformación es homogénea, la distribución de presiones presenta únicamente un máximo localizado en el punto neutro. Sin embargo, cuando la deformación es no homogénea ($H < 3$) el patrón de distribuciones de presiones presenta dos máximos, cada uno localizados próximos a la zona de entrada y salida respectivamente, como quedó demostrado en la literatura [6].

Nuevos estudios, han querido ir más allá, y mediante el análisis más exhaustivo del proceso de laminación plana en frío, bajo condiciones de deformación no homogénea ($H < 3$) [4], han demostrado la existencia de un cambio de patrón de distribuciones de presiones a medida que decrece el parámetro H . Se pasa del patrón propio de las deformaciones no homogéneas presentando dos máximos, a presentar un único máximo localizado en la entrada del contacto. Este hecho puede ser producido a que al disminuir H , deformaciones cada vez menos homogéneas, aparecen tensiones residuales más elevadas. Coincidiendo el cambio de patrón con el cambio de obtener tensiones residuales de compresión a tensiones residuales de tracción.

Por tanto, el propósito de realizar este análisis de las tensiones residuales encontradas en el material una vez laminado es el obtener una aproximación del valor del parámetro H , en el que según esta teoría se produciría el cambio de patrón de distribuciones de presiones, bajo el supuesto de deformaciones no homogéneas.

Para llevar a cabo el análisis de las tensiones residuales obtenidas en el modelo desarrollado, se van a realizar simulaciones para diferentes valores del parámetro H , siempre inferiores a 3, cumpliendo la condición de deformación no homogénea. Se van reproducir procesos de laminación con reducciones del 2, 5, 10, 15, 20, 30, 40 y 50 %, reducciones que haciendo uso de la expresión presentada en la **Ecuación 2.3.1. 1** les corresponden el valor del parámetro H igual a 0.07, 0.175, 0.35, 0.53, 0.7, 1.05, 1.4 y 1.75, respectivamente.

En la **Gráfica 4.1. 1** se muestra la evolución de los valores en la superficie de las tensiones residuales normales en la dirección de laminación σ_{xx} siendo x la dirección de laminación en función del grado de homogeneidad del laminado, H .



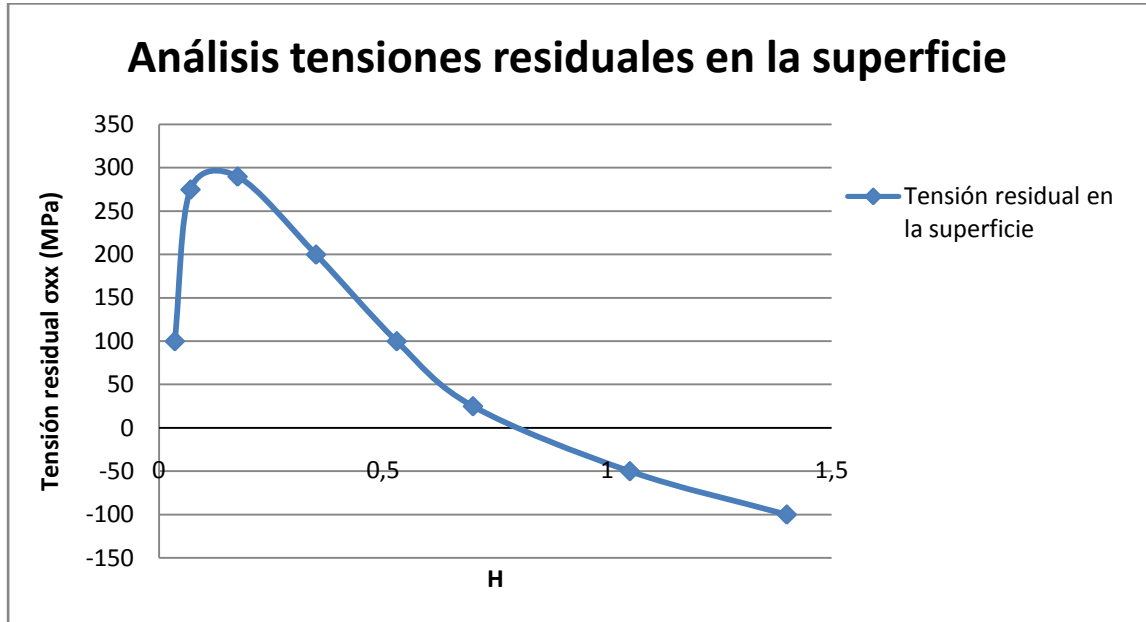
Gráfica 4.1. 1 – Valores en la superficie de las tensiones residuales normales en dirección de laminación, en función del parámetro H .

Como ya se apuntó anteriormente, en la **Gráfica 4.1. 1** se puede observar como a medida que disminuye el valor del parámetro H , es decir, a medida que se realizan menores reducciones de espesor, el valor en la superficie de la tensión residual normal en la dirección de la laminación aumenta.

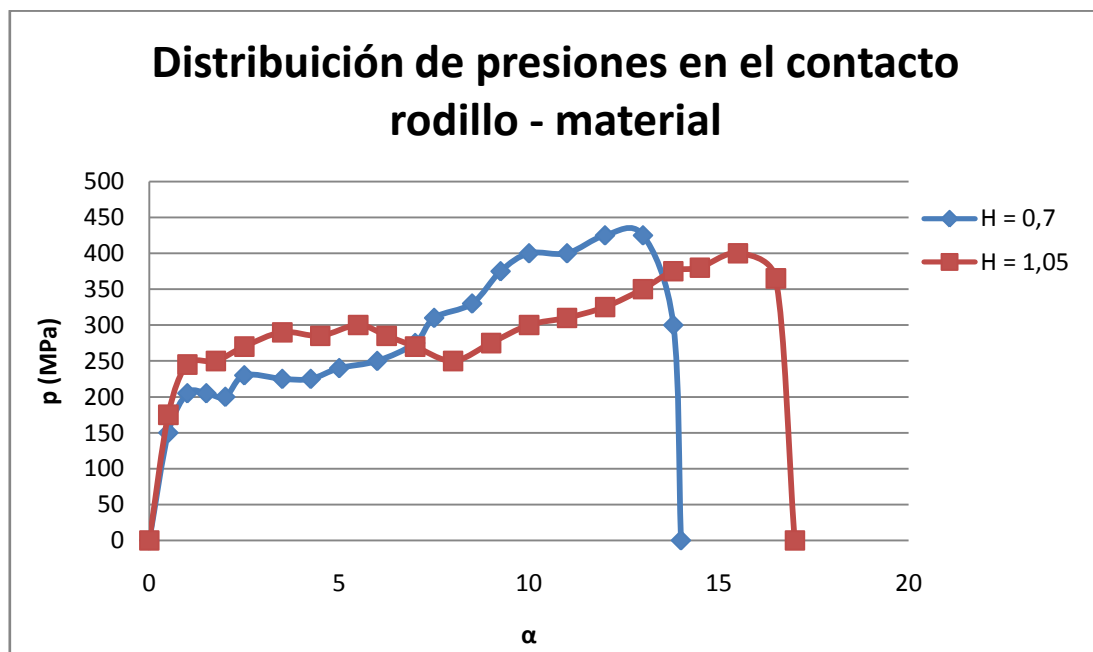
Para mayores reducciones de espesor se obtienen tensiones residuales de compresión (signo negativo), mientras que a menores reducciones se obtienen tensiones de tracción (signo positivo). El cambio de signo en las tensiones residuales, se produce en torno al valor de $H = 1,5$, esto equivale a reducciones comprendida entre el 40 – 50 % de su espesor.

Por tanto según la teoría extraída de la literatura [4], para valores de $1,4 < H < 1,75$ donde se produce el cambio de signo de las tensiones residuales, igualmente se producirá el paso de la configuración de dos máximos localizados en torno a la entrada y la salida de la zona de contacto, a la de un único máximo localizado en la entrada de la zona de contacto.

Este valor obtenido de H ($H \approx 1,5$) no coincide con el valor de H obtenido mediante el modelo numérico propuesto en [4]. Donde para $H \approx 1$ como se muestra en la **Gráfica 4.1. 2** y **Gráfica 4.1. 3**, coincide tanto el paso de un patrón de distribuciones de presiones a otro, como el cambio de signo de las tensiones residuales en la superficie.



Gráfica 4.1. 2 – Valores en la superficie de las tensiones residuales normales en la dirección de laminación, en función del parámetro H [4].



Gráfica 4.1. 3 – Evolución de la presión en el contacto rodillo-material para reducciones del 30 y el 20 % [4].

Este desfase entre el valor de H obtenido en [4] y el valor de H obtenido mediante el modelo numérico desarrollado en el presente trabajo, puede ser consecuencia de las fuerzas de laminación obtenidas por cada modelo. Como se vio durante la validación del modelo, la fuerza de laminación obtenida mediante el modelo desarrollado era ligeramente superior para cada una de las reducciones estudiadas respecto de las fuerzas de laminación expuestas en [4], cometiendo un error medio del 4,11 % (Véase **Gráfica 3.5. 1**). Este error que distancia a ambos modelos, unido al hecho de que en el modelo principal desarrollado no se ha tenido en cuenta el aumento de temperatura debido a la fricción material – rodillo, aspecto que sí ha sido considerado en el modelo presentado en [4], lo que provoca el fenómeno conocido como ablandamiento térmico, puede ser razón suficiente para que las tensiones residuales presentes en el material una vez sometido al proceso de laminado sean superiores, por lo que su cambio de tensiones de compresión a tensiones de tracción se producirá sin la necesidad de reducir excesivamente el espesor del material, por lo tanto a un valor de H mayor, como se ha obtenido.

Finalmente, en la **Gráfica 4.1. 1** se observa como la tensión residual alcanza su máximo para valores comprendidos entre $0,07 < H < 0,175$, es decir para reducciones de entre el 2 – 5 %. Este comportamiento es justificable atendiendo al hecho de que al disminuir H , el proceso de deformación se comporta cada vez menos homogéneamente, por lo que para compensar esta deformación aparecen tensiones residuales mayores. Estas tensiones llegan a su valor máximo y a pesar de que su deformación es menos homogénea, la reducción es tan pequeña y por tanto su grado de deformación es tan bajo, que las tensiones residuales disminuyen progresivamente hasta anularse completamente cuando la reducción es del 0 %.

4.2 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL RODILLO TIPO WIRE.

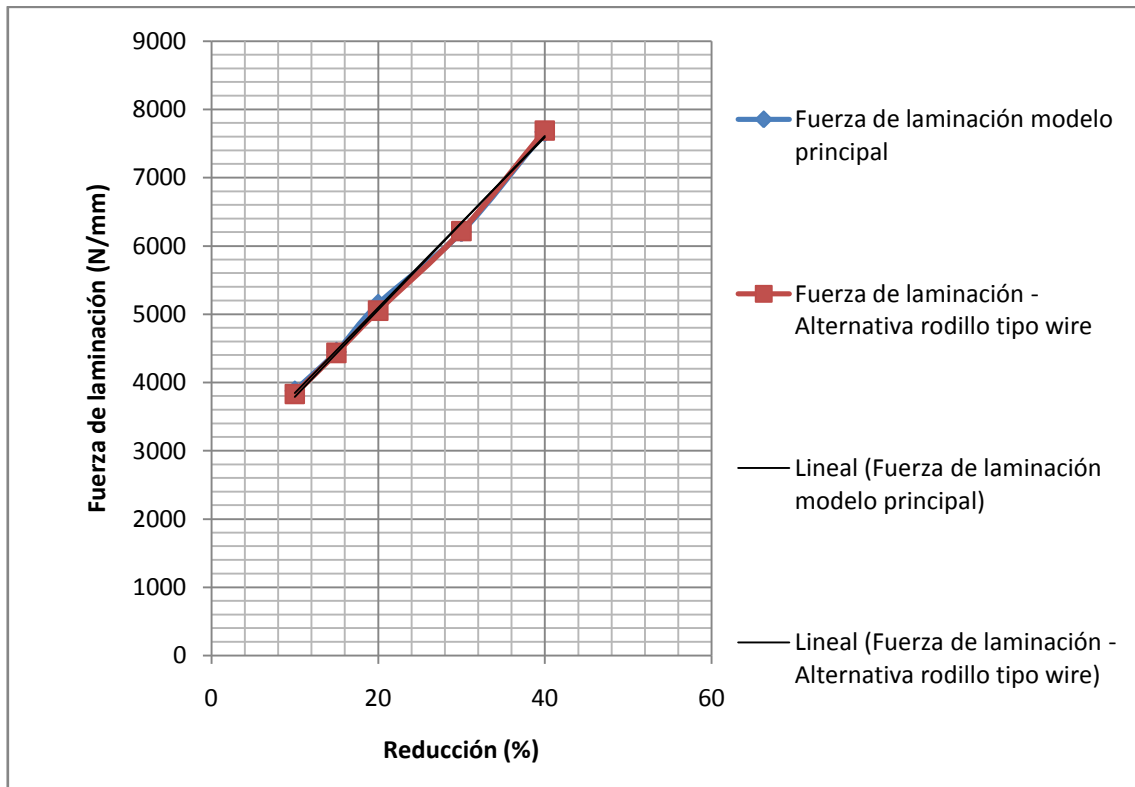
La primera de las alternativas propuesta tiene como objetivo reducir lo máximo posible el gasto computacional del modelo desarrollado. Para ello, se modificó la definición geométrica del rodillo.

En el modelo principal el rodillo se encuentra definido como una *part* tipo sólido deformable, donde su geometría consiste en una corona circular de radio mayor 70 mm y espesor exterior 30 mm. Como alternativa, el rodillo se ha redefinido como una *part* tipo *wire*, donde su geometría consiste únicamente en una circunferencia de 70 mm de radio.

Esta simplificación llevada a cabo, además de provocar una reducción en el gasto computacional del modelo, conlleva con ello generalmente una pérdida sobre el control de las variables. Para comprobar la veracidad de esta afirmación, se ha procedido a la realización de un estudio de las fuerzas de laminación obtenidas por este nuevo modelo, una variable que ya ha sido estudiada en el modelo principal durante su validación y cuyos datos obtenidos sirven como referencia para realizar el análisis.

Para realizar el análisis se han realizado al igual que para la validación del modelo desarrollado, simulaciones de reducciones del 10, 15, 20, 30 y 40 % de espesor del material laminado.

La comparativa entre los valores de fuerza de laminación obtenidos por ambos modelos se muestra en la **Gráfica 4.2. 1**.



Gráfica 4.2. 1 - Comparativa entre fuerzas de laminación obtenidas mediante el modelo desarrollado y las obtenidas mediante la alternativa del modelo con el rodillo tipo wire.

Como se observa en la **Gráfica 4.2. 1**, la redefinición del rodillo como *part* tipo *wire* no ha tenido consecuencias negativas en el control de la variable estudiada, contradiciendo al pensamiento inicial de que si las tendría. Además, no sólo no se han obtenido consecuencias negativas, sino que se ha producido una ligera mejoría en el error medio obtenido, si es comparado con los resultados de fuerza de laminación presentados en [4]. El error medio de las simulaciones llevadas a cabo mediante este nuevo modelo ha sido del **3,63 %**, ligeramente inferior al error del 4,11 %.

Como si era de esperar, dicha modificación ha provocado un importante descenso del gasto computacional para la realización de las simulaciones. En el modelo principal el gasto computacional necesario para realizar las simulaciones era de entorno a 36 minutos, mientras que mediante la modificación llevada a cabo el gasto computacional necesario se ha reducido hasta los **16 minutos**, lo que significa un descenso del 44.44 %.

Pese a esta mejoría obtenida en el desarrollo del modelo, no es suficiente para que mediante el estudio de sus tensiones residuales en la superficie se obtenga un descenso en el valor del parámetro H en el cual se produce el cambio de signo. Este valor de H obtenido mediante el nuevo modelo, permanece en torno a $H \approx 1,5$ lejos del obtenido por los resultados obtenidos en [4].

No obstante, este hecho negativo no impide que el modelo desarrollado con la modificación presentada, sea el modelo escogido para trabajos futuros y futuras modificaciones.

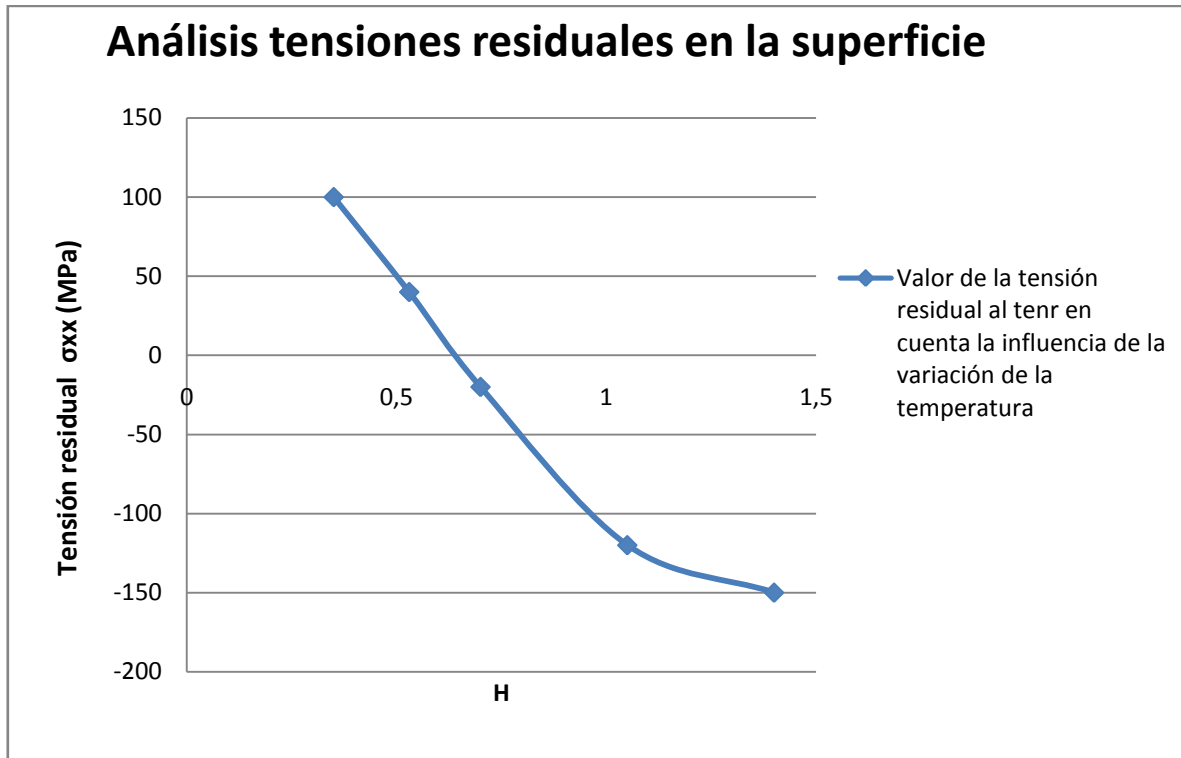
4.3 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA VARIACIÓN TÉRMICA. INFLUENCIA DE LA DEFINICIÓN DEL MATERIAL LAMINADO MEDIANTE LA ECUACIÓN CONSTITUTIVA DE JOHNSON - COOK.

En la presente alternativa al modelo desarrollado, se han realizado una serie de modificaciones con el objetivo de incluir en el modelo principal la influencia de la variación térmica provocada a la fricción lámina – rodillo durante el proceso de laminado.

Al incluir este aumento de temperatura, es de esperar que las tensiones residuales en la superficie disminuyan considerablemente respecto del modelo principal desarrollado. En este se producía el cambio de signo de dichas tensiones residuales para valores de H comprendidos entre 1.4 – 1.75, es decir, para reducciones de entre el 40 – 50 %.

A continuación se lleva a cabo un análisis de las tensiones superficiales en la superficie, obtenidas mediante el modelo desarrollado incluyendo la influencia de la variación. Con el objetivo, de probar que esta influencia provoca los resultados esperados. Para realizar el análisis se han realizado simulaciones de reducciones del 10, 15, 20, 30 y 40 % de espesor del material laminado.

En la **Gráfica 4.3. 1** se muestra la evolución de los valores en la superficie de las tensiones residuales normales en la dirección de laminación σ_{xx} siendo x la dirección de laminación en función del grado de homogeneidad del laminado, H .

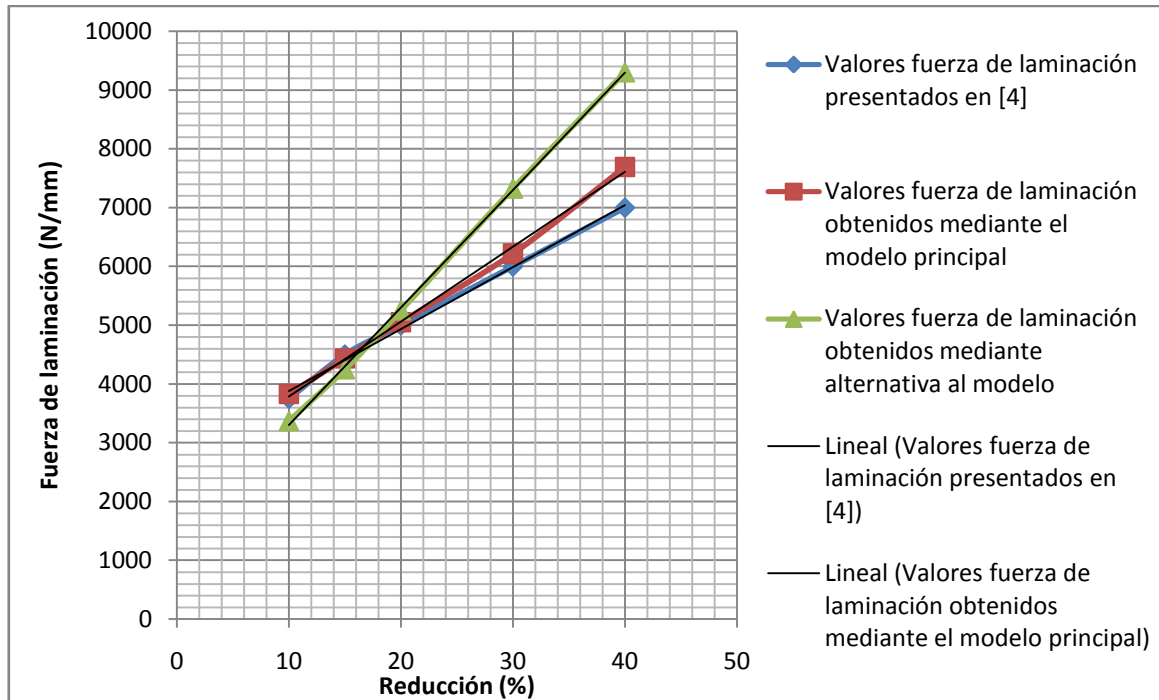


Gráfica 4.3. 1 – Valores en la superficie de las tensiones residuales normales en dirección de laminación, en función del parámetro H. Para el modelo desarrollado incluyendo la influencia de la variación térmica.

Como era de esperar, se puede observar en la **Gráfica 4.3. 1**, como se han reducido de manera más que pronunciada los valores de las tensiones residuales en la superficie para cada uno de los valores H estudiados. De tal modo que el cambio de signo, que en el modelo principal se producía para valores de $H \approx 1,5$, es decir, reducciones comprendidas entre el 40 – 50 % del espesor inicial, incluyendo la influencia de la variación térmica a descendido hasta valores de H comprendidos entre $0,53 < H < 0,7$, es decir, para reducciones comprendidas entre el 15 – 20 % del espesor inicial.

No obstante, aunque se ha probado la disminución de de las tensiones residuales en la superficie, no se han obtenido los resultados esperados. En la artículo [4] de la literatura científica, lo valores de H para los que se produce el cambio de signo de las tensiones residuales en la superficie, corresponden a reducciones de entre el 20 – 30 % del espesor inicial. Aunque la diferencia no es grande, puede ser explicada mediante el estudio de las fuerzas de laminación obtenidas en ambos modelos, y de esta manera comprobar el error que conlleva la alternativa de modelo presentada.

En la **Gráfica 4.3. 2** se presenta una comparativa entre los valores de la fuerza de laminación presentados en [4], los obtenidos mediante el modelo principal y los obtenidos mediante la presente alternativa de modelo.



Gráfica 4.3. 2 - Comparativa entre fuerzas de laminación obtenidas mediante el modelo desarrollado, el modelo incluyendo la influencia de la variación térmica y los resultados presentados en [4].

En la **Gráfica 4.3. 2** se observa cómo a partir de una reducción del 17 % la fuerza de laminación presenta un comportamiento lineal creciente con una pendiente mayor que la encontrada en los casos anteriormente estudiados. Debido al fenómeno de ablandamiento térmico presente al incluir la influencia térmica, la fuerza de laminación requerida para un mismo porcentaje de reducción debe de ser inferior. Por tanto, los resultados obtenidos para reducciones superiores al 17 % en las que se requiere mayor fuerza que en los anteriores casos llevados a estudio, no se corresponden con lo previamente esperado, por lo que será necesario un estudio más profundo para su completa comprensión.

El diferente comportamiento presente en la evolución de la fuerza de laminación estudiada en ambos modelos, puede ser razón suficiente para explicar el error cometido en el cálculo del valor de H en el que se produce el cambio de signo.

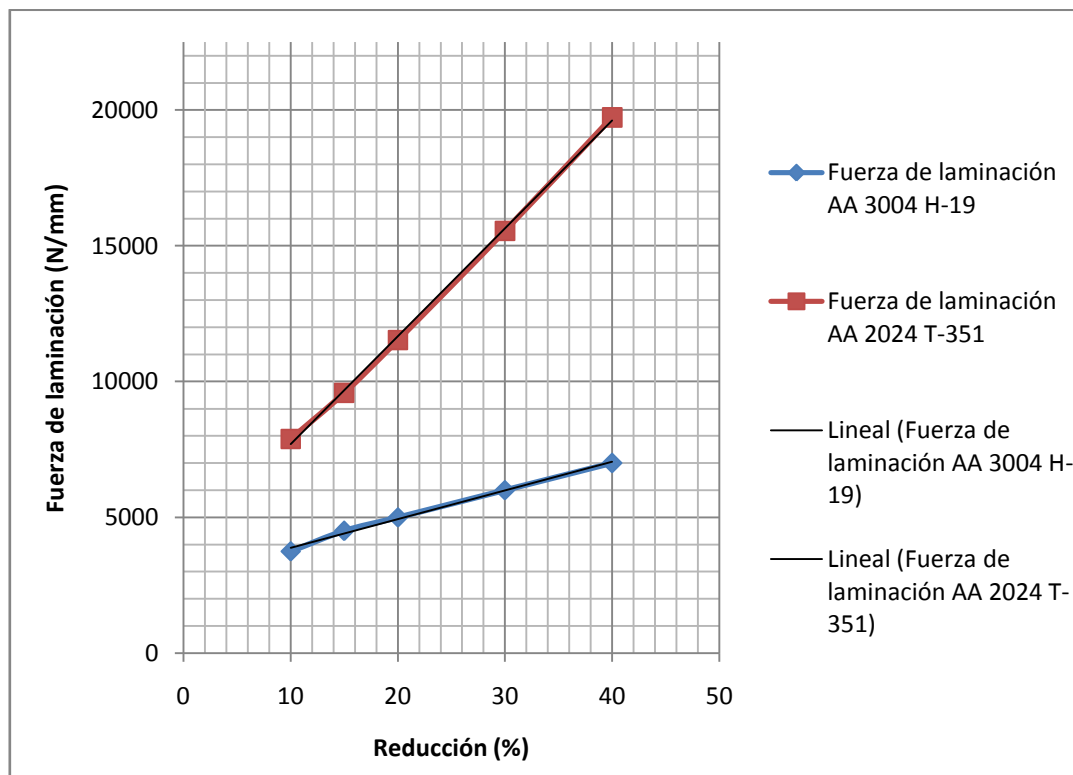
4.4 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DEL CAMBIO DE MATERIAL.

En esta última alternativa al modelo desarrollado, se ha procedido a la laminación del aluminio forjado con tratamiento térmico denominado AA 2024 T-351. Se trata de una aleación de aluminio – cobre, muy extendida en la industria aeronáutica debido a su alta resistencia y baja densidad.

Ante la imposibilidad de encontrar en la literatura científica datos experimentales o cualquier otra fuente de la que poder extraer resultados de un proceso de laminado de la aleación AA 2024 T-351 bajo condiciones similares a las que se representan en el modelo numérico desarrollado, el análisis de la presente alternativa al modelo principal, se hará con fines meramente ilustrativos. No obstante, servirá para dar una idea del proceso simulado y de la influencia que tiene el cambio de material en el modelo principal desarrollado, pero no tendrá validez alguna debido a que sus resultados no han podido ser validados.

Para la realización del estudio de los valores de las tensiones residuales en la dirección de laminación, se han llevado a cabo al igual que en los modelos anteriores, simulaciones del proceso de laminado plano bajo condiciones de deformación no homogénea, con reducciones del 10, 15, 20, 30 y 40 % del espesor inicial.

En primer lugar se ha realizado una comparativa entre los valores de la fuerza de laminación presentados en [4], obtenidos al someter a la aleación AA 3004 H-19 al proceso de laminado plano y los obtenidos mediante las simulaciones descritas en la presente alternativa al modelo, al someter a la aleación AA 2024 T-351 al proceso.

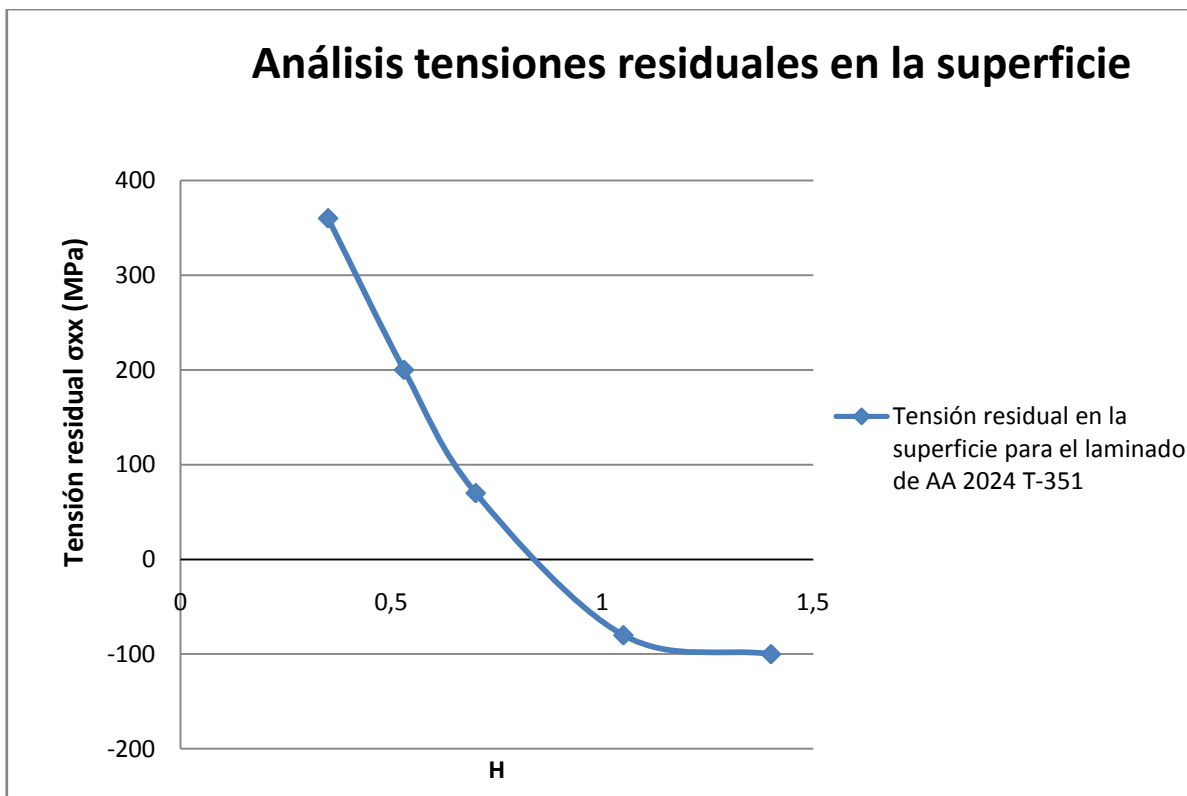


Gráfica 4.4. 1 - Comparativa entre fuerzas de laminación obtenidas mediante el modelo presentado en [4] y las obtenidas mediante la alternativa del modelo con el material AA 2024 T-351.

Como se puede observar en la **Gráfica 4.4. 1**, los valores que toman la fuerza de laminación para el AA 2024 presentan una gran diferencia respecto a los valores obtenidos mediante la laminación del AA 3004. Para lograr el mismo porcentaje de reducción de espesor para el AA 2024 es necesario aplicar más del doble de fuerza que la necesaria para la aleación AA 3004. Esta diferencia en los resultados obtenidos era de esperar, ya que atendiendo a los parámetros que definen la ecuación constitutiva de Johnson – Cook para el AA 3004 y AA 2024 presentados en la **Tabla 3.4.2. 1** y en la **Tabla 3.4.3. 3** respectivamente. Se puede comprobar cómo la constante A, B y n para el AA 2024 son de valores superiores capaces de explicar este aumento, ya que A es el límite elástico a temperatura ambiente y tanto B representan el efecto de endurecimiento por deformación.

Para finalizar el estudio de las fuerzas de laminación, es conocido el hecho de que para aplicar mayor fuerza de laminación es necesario un mayor gasto de energía, lo que significa un mayor gasto de dinero, razón por la cuál sería recomendable el procesar dicho material mediante un proceso de conformado alternativo más apropiado a sus características.

En la **Gráfica 4.4. 2** se muestra la evolución de los valores en la superficie de las tensiones residuales normales en la dirección de laminación σ_{xx} siendo x la dirección de laminación en función del grado de homogeneidad del laminado, H.



Gráfica 4.4.2 - Valores en la superficie de las tensiones residuales normales en la dirección de laminación, en función del parámetro H, para el proceso de laminado del AA 2024 T-351.

En la **Gráfica 4.4. 2** se puede observar como el cambio de signo de la tensión residual se produce para valores de H comprendidos entre $0.7 < H < 1.05$, lo que equivale a reducciones de entre el $20\% < r < 30\%$. Curiosamente mismos valores para los que se produce el cambio de signo en la aleación AA 3004 H-19 como se presenta en [4]. Esta apreciación puede llevar a generalizar que el cambio de signo en los valores de las tensiones residuales obtenidas en la superficie una vez laminado el material, siempre y cuando este se trate de una aleación de aluminio, se encontrará en torno a reducciones del $20 - 30 \%$. No obstante esta última afirmación debe ser probada mediante futuros estudios más exhaustivos.

Capítulo 5

5. MARCO REGULADOR.

El estudio que se muestra en el presente Trabajo de Fin de Grado puede servir como punto de partida para la apertura de nuevas vías de estudio e investigación sobre el comportamiento de distintos materiales al ser sometidos a un proceso de laminación. Estos nuevos trabajos pueden estar apoyados sobre la recogida de datos en plantas de fabricación de productos laminados. Estas plantas de fabricación deben de estar regidas por un sistema de administración que cumpla una serie de normativas e instrucciones que aseguren el correcto funcionamiento de la planta para asegurar la calidad de los productos laminados.

5.1 NORMAS ISO.

Estas normativas e instrucciones, normas ISO, son reguladas a nivel mundial por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO).

El sistema de administración de una empresa dedicada a la producción de productos laminados, al igual que el resto de empresas independientemente del tamaño y del sector al que se dedique, básicamente debe cumplir dos normas ISO internacional. Una de ellas referente a la gestión de calidad de sus productos y otra referente a la gestión ambiental de la empresa.

Los sistemas de gestión de calidad de las empresas están regidos por las normas ISO de la serie 9000. Un sistema de gestión de calidad de una empresa permite comprender los procesos de entrega de productos y prestación de servicios a los clientes, y el cumplimiento de normas de la serie 9000 lo hace posible. Es destacable la norma 9001.

La norma ISO 9001 es un marco de calidad genérico necesario para supervisar y mejorar el rendimiento de cualquier área de una empresa. El cumplimiento de este marco de calidad permite aumentar la participación en el mercado de la empresa, reducir costes, gestionar los riesgos con mayor eficacia y mejorar la satisfacción de los clientes. Para ello es necesario la realización de las tareas que la norma recoge [16-17]:

- a) Determinar los procesos necesarios para el sistema de gestión de calidad y su aplicación a través de la organización.
- b) Determinar la secuencia e interacción de estos procesos.
- c) Determinar los criterios y los métodos necesarios para asegurarse de que tanto la operación como el control de estos procesos sean eficaces.
- d) Asegurarse de la disponibilidad de recursos e información necesarios para apoyar la operación y el seguimiento de estos procesos.

- e) Realizar el seguimiento, la medición cuando sea aplicable y el análisis de estos procesos.
- f) Implementar las acciones necesarias para alcanzar los resultados planificados y la mejora continua de estos procesos.

Por otro lado, la gestión ambiental de una empresa se rige por el cumplimiento de las normas ISO de la serie 1400. Es destacable la norma 14001, ya que describe en qué debe constar un sistema de gestión Ambiental pero sin especificar cómo se debe desarrollar en cada empresa, lo que no obliga a las empresas a perder su identidad, permitiendo su adaptación a los principios y características de cada una de ellas.

La norma ISO 14001 fue diseñada para mantener el complicado equilibrio entre el aumento de la rentabilidad de una empresa y la reducción del impacto ambiental. Este equilibrio se puede llegar a lograr mediante la realización de las siguientes tareas [18]:

- a) Identificación de aspectos que tienen un impacto en el medio ambiente y comprensión de las leyes medioambientales que son significativas para esta situación.
- b) Generar objetivos de mejora y un programa de gestión para alcanzarlos.
- c) Realización de revisiones periódicas para la continua mejora.

5.2 NORMAS OHSAS.

Uno de los aspectos fundamentales en la gestión de una empresa es poseer la capacidad de asegurar la seguridad de los trabajadores. Para ello la mayoría de las empresas implantan un sistema de gestión de la salud y la seguridad en el trabajo (SGSST), fomentando así los entornos de trabajo seguro y saludable.

Ante la necesidad de especificación de evaluación reconocida internacionalmente de estos sistemas de gestión la British Standards Institution (BSI) creó las normas OHSAS. Es destacable la norma OHSAS 18001.

La norma OHSAS 18001 trata siguientes áreas clave [19]:

- a) Planificación para identificar, evaluar y controlar los riesgos.
- b) Programa de gestión de OHSAS.

- c) Estructura y responsabilidad.
- d) Formación, concienciación y competencia.
- e) Consultoría y comunicación.
- f) Control de funcionamiento.
- g) Preparación y respuesta ante emergencias.
- h) Medición, supervisión y mejora del rendimiento.

Tanto la norma OHSAS 18001, como la ISO 14001 y la ISO 9001, han sido concebidas para ser compatibles entre ellas compartiendo muchos de sus principios, por lo que dan la posibilidad a la empresa de optar por un sistema de gestión integrada.

Capítulo 6

6. PRESUPUESTO DEL ANÁLISIS NUMÉRICO.

En el capítulo que se abre, se hace referencia al coste económico que ha conllevado la realización del proyecto desarrollado en el presente Trabajo de Fin de Grado. Incluyendo un presupuesto detallado y definido en todos sus aspectos.

6.1 PRESUPUESTO.

1. **AUTOR:** Francisco Javier Abellán Cabrera.

2. **DEPARTAMENTO:** Ingeniería Mecánica.

3. **DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO:**

Título.....Análisis numérico del proceso de laminación.

Duración (meses).....3

Tasa de costes indirectos.....20 %.

4. **PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO (VALOR EN EUROS):** 24.644,59 EUROS.

5. **DESGLOSE DEL PRESUPUESTO (COSTES DIRECTOS):**

PERSONAL: Apellidos y nombre	CATEGORÍA	DEDICACIÓN HOMBRE MES (MESES)	COSTE HOMBRE MES	COSTE (EUROS)
Marco Esteban, Miguel	Ingeniero Senior	1	4.289,54	4.289,54
Moreno Sánchez, Carlos Edgar	Ingeniero	1	2.634,39	2.684,39
Abellán Cabrera, Francisco Javier	Ingeniero	3	2.634,39	7.903,17
TOTAL				14.877,10

Tabla 6.1. 1 – Costes de personal.

HOMBRE MES – 131,25 horas. Máximo de dedicación de 12 hombres al mes (1575 horas).

Máximo anual para PDI de la Universidad Carlos III de Madrid de 8,8 hombres mes (1155 horas).

EQUIPOS	COSTE (EUROS)	% USO DEDICACIÓN PROYECTO	DEDICACIÓN (MESES)	PERIODO DEPRECIACIÓN	COSTE IMPUTABLE
Ordenador personal	579,00	90	3	60	26,06
Licencia Abaqus	25.040,00	90	3	60	5.634,00
Paquete Microsoft Office	110,00	10			
TOTAL					5.660,06

Tabla 6.1. 2 – Coste de equipos.

LICENCIA ABAQUS		
ALQUILER ANUAL DEL PROGRAMA ABAQUS	PERIODO (AÑOS)	IMPORTE (EUROS)
Programas análisis Abaqus	1	21.950,00
Pre y Post-procesador Abaqus/CAE: 1 puesto de trabajo	1	00,00
Interfaz asociativa con CATIA V5	1	2.595,00
Mantenimiento y asistencia técnica	1	00,00
1 juego de documentación del programa	n/a	00,00
Gastos primera instalación		495,00
TOTAL		25.040,00

Tabla 6.1. 3 – Desglose coste de licencia Abaqus.

La expresión empleada para el cálculo de la amortización es la siguiente:

$$\text{Coste imputacional} = \frac{A}{B} \cdot C \cdot D \quad (\text{Ecuación 6.1.1})$$

Donde:

- A es el número de meses desde la fecha de facturación en que el equipo es empleado.
- B es el periodo de depreciación (compras: 60 meses / alquiler de 1 año: 12 meses).
- C es el coste del equipo (sin IVA).
- D es el % del uso que se dedica al proyecto.

6. RESUMEN DE COSTES:

PRESUPUESTO COSTES TOTALES	
Personal	14.877,10
Amortización	5.660,06
Subcontratación de tareas	00,00
Costes de funcionamiento	00,00
Costes indirectos	4.107,43
TOTAL	24.644,59

Tabla 6.1. 4 – Costes Totales.

Capítulo 7

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

7.1 CONCLUSIONES.

En el presente Trabajo de Fin de Grado se ha desarrollado un modelo numérico en el código de elementos finitos Abaqus con capacidad general y validado en términos de la fuerza de laminación mediante la comparativa de sus resultados con los obtenidos por un modelo numérico alternativo encontrado en la literatura científica. Este modelo ha permitido realizar simulaciones con el objetivo de estudiar distintas variables que intervienen en un proceso de laminado plano.

- ✓ El modelo de elementos finitos desarrollado ha sido validado en términos de fuerza de laminación obteniendo un error medio del 4.11 %, un porcentaje considerablemente inferior al 10 % de error máximo que se considera admisible. Hecho que permite afirmar que se ha conseguido desarrollar un modelo numérico con la capacidad de obtener resultados de un alto grado de fidelidad a la realidad.
- ✓ El modelo numérico desarrollado ha servido para el estudio de la evolución de las tensiones residuales en la superficie del material una vez sometido al proceso, con el objetivo de analizar el porcentaje de reducción de espesor necesario para provocar el cambio de signo en las tensiones residuales encontradas. El modelo desarrollado ha obtenido unos resultados que conducen a que la reducción necesaria se encuentra entre el 40 – 50 % de reducción de espesor inicial, considerablemente superior a los resultados presentados en la literatura científica. Esta diferencia puede ser debida al error obtenido durante la validación del modelo y a la influencia de la variación térmica no considerada en el desarrollo del modelo. Por tanto los resultados del análisis de la evolución de las tensiones residuales en la superficie del material laminado, son considerados no concluyentes.

Una vez realizados los diferentes estudios se ha utilizado el modelo desarrollado como base para obtener mediante una serie de modificaciones, distintas alternativas al modelo con las que conseguir realizar el estudio de dichas modificaciones sobre los resultados obtenidos por el modelo desarrollado.

- ✓ En la primera de las alternativas propuestas, se modifica el tipo de *part* del rodillo, sustituyendo un rodillo tipo deformable por uno tipo *wire*. Con dicha modificación se busca simplificar al máximo posible el modelo desarrollado, con el objetivo de que se traduzca en una reducción del gasto computacional empleado por el modelo. Con la modificación, no sólo se logró el objetivo buscado, reduciéndose el tiempo empleado en la simulación en un 44.44% sino que además, en contra de la idea inicial de que el cambio de definición geométrica repercutiría en un menor control de las variables, en el estudio de los resultados de fuerza de laminación obtenidos se pudo comprobar cómo el error medio respecto de los

resultados presentados en la literatura científica había disminuido. Ello hace indicar, que para futuros estudios al modelo empleado se le deberían realizar las modificaciones expuestas.

- ✓ Con el objetivo de estudiar la influencia de la variación térmica provocada por la fricción lámina – rodillo sobre el modelo desarrollado se expuso la segunda de las alternativas propuestas. En ella se define el comportamiento del material mediante la ecuación constitutiva de Johnson – Cook para modelar más fielmente el comportamiento térmico del material laminado. La alternativa propuesta ha permitido comprobar cómo gracias al aumento de temperatura debido a la fricción en el contacto lámina – rodillo provoca una reducción más que considerable en los valores de tensión residual en la superficie del material laminado. Lo que significa, que la reducción necesaria para producir el cambio de signo de las tensiones residuales en la superficie se ha visto reducido.
- ✓ Como última alternativa al modelo propuesta, se realiza un cambio en la elección del material laminado. En este caso se selecciona una aleación de aluminio – cobre, por que los resultados obtenidos en el estudio de las fuerzas de laminación presentan valores muy superiores para un mismo porcentaje de reducción, a los obtenidos en el modelo principal, debido a la diferencia de resistencia existente entre ellos, como se puede comprobar a través de la comparación de las constantes A, B y n que definen la ecuación constitutiva de Johnson – Cook para cada una de los materiales. Aunque los valores de fuerza de laminación no son comparables, permiten recomendar un cambio en el proceso de conformación para manipular la aleación empleada. El estudio de la evolución de los valores de las tensiones residuales en la superficie del material una vez laminado, permite observar una cierta semejanza en el porcentaje de reducción necesario para producir el cambio de signo de dichas tensiones residuales. Lo que hace pensar que este porcentaje es similar para la totalidad de las aleaciones de aluminio, no obstante para corroborar esta afirmación son precisos estudios más exhaustivos.

7.2 TRABAJOS FUTUROS.

Para el avance en el conocimiento del comportamiento 2D de materiales sometidos a procesos de laminación plana en frío bajo condiciones de deformación no homogénea ($H < 3$), se proponen los siguientes trabajos futuros:

- ✓ *Realización de ensayos experimentales propios para recabar mayor información.* El modelo desarrollado ha sido validado en términos de la fuerza de laminación mediante los resultados obtenidos por otro modelo numérico presentado en la literatura científica [4] El emplear datos experimentales recogidos por ensayos propios, puede ayudar a obtener resultados

más acordes con la realidad. A demás permitiría validar el modelo en términos de variables distintas a la empleada.

- ✓ *Creación de un modelo numérico en que el material AA 3004 fuera sometido a un proceso de laminación con el objetivo de obtener un perfil curvo.* El proceso de laminación “curva” consiste en disponer distintos pares de rodillos enfrentados de tal manera que al finalizar el material su recorrido por los distintos pares de rodillos, se obtiene un perfil curvo del radio deseado. Con la realización de estas simulaciones se podría realizar una comparativa entre el comportamiento de la aleación de aluminio – manganeso sometida a un proceso de laminado plano y curvo.
- ✓ *Estudio más profundo de la segunda alternativa propuesta al modelo desarrollado.* La segunda alternativa al modelo principal consiste en incluir la influencia de la variación térmica mediante una serie de modificaciones. Durante el análisis de resultados, se ha visto como la evolución de la fuerza de laminación a partir del 17% de reducción, presenta un comportamiento lineal creciente con una pendiente mayor que la encontrada en los casos estudiados anteriormente. Al considerar el aumento de temperatura debido a la fricción lámina – rodillo, se produce el fenómeno de ablandamiento térmico, por lo que el efecto de necesitar mayor fuerza para un mismo porcentaje de reducción no se corresponde con lo esperado. Es necesario un estudio más profundo para comprender dicho efecto.
- ✓ *Validación de la tercera alternativa propuesta al modelo desarrollado.* La tercera alternativa al modelo consiste en someter al proceso de laminación a la aleación de aluminio AA 2024 T-351. Se ha detectado cierta semejanza entre el valor de H para el que los valores en la superficie de las tensiones residuales normales en la dirección de laminación cambia de signo en ambos materiales llevados a estudio. Esta apreciación no tiene ninguna validez científica, hasta que no se realice la comparación de los resultados obtenidos con resultados veraces.
- ✓ *Aplicación del modelo desarrollado a distintos materiales.* Como alternativa del modelo desarrollado ya se ha realizado la aplicación del modelo a una aleación de aluminio distinta a la empleada en un principio. Es recomendable seguir aplicando el modelo desarrollado a distintas aleaciones de aluminio. De este modo sería posible realizar una comparativa entre la evolución de las tensiones residuales que aparecen, y comprobar la posibilidad de la existencia de un cierto grado de escalabilidad entre los resultados obtenidos por las simulaciones realizadas a cada una de ellas. También sería recomendable, aplicar el modelo al laminado de aceros comúnmente empleados en distintos procesos de conformado y así deducir las ventajas e inconvenientes de emplearlos en el proceso estudiado.

Capítulo 8

8. BIBLIOGRAFÍA.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1] Salcedo Vázquez, V. *Protocolo de uso de una máquina de termo fluencia y caracterización del comportamiento mecánico a alta temperatura del aluminio aleado mecánicamente*. Proyecto de Fin de Carrera en Ingeniería Aeronáutica, Universidad de Sevilla, 2011.
- [2] Zoë, Ryan. *Building with Water*. Birkhauser GmbH (2010) p. 82.
- [3] Groover, Mikell P., *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas*. 1ª ed, 1977, pp. 448 – 458.
- [4] Ortiz Vargas Machuca, R. A. et al. *Análisis Numérico de la Laminación Plana en Frío del Aluminio AA 3004*. En: *Anales de ingeniería mecánica*. 2003. Vol. 14. pp. 1563-1567.
- [5] Li, G., Kobayashi, S. *J. Eng. Ind.* Vol. 104 (1982), p. 55.
- [6] Al-Salehi, F.A.R., Firbank, T.C. y Lancaster, P.R. *Int. J. Mech. Sci.*, Vol 15 (1973) p 693.
- [7] Wang Hongxin and Zha Xiaoxiong. *Dynamic mechanical behavior and constitutive model of 3004 aluminum*. 2011. School of Civil and Environment Engineering, Harbin Institute of Technology Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China.
- [8] Rodríguez Millán, M. *Análisis numérico del comportamiento frente al impacto de aluminio 2024 – T351 sometido a ensayo de Taylor*. Proyecto Fin de Carrera en Ingeniería Industrial, Universidad Carlos III de Madrid, 2009.
- [9] Wierzbicki, T., Teng, X., Hiermaier, S., and Rohr, I. *Numerical prediction of fracture in the Taylor Test*. *International Journal of Solids and Structures*, 2929 – 2948.
- [10] Rowe, G. W. *Principles of Industrial Metalworking Processes*, Edward Arnold, London, (1977).
- [11] Orowan, E., *Proc. I. Mech. E.*, Vol. 150 (1943), p. 140.
- [12] Bland, D. R. and Ford, H., *Proc. I. Mech. E.*, Vol. 159 (1948), p.144.
- [13] Dieter, George E. *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill.
- [14] Galeano Bilbao, J. *Análisis Numérico del efecto de la flexión en el conformado de chapas*. Proyecto de Fin de Carrera, Universidad de Sevilla, 2009.
- [15] Abaqus User's Manual, Volume IV: Elements, DS Simulia.

- [16] <http://farmacia.unmsm.edu.pe/noticias/2012/documentos/ISO-9001.pdf>
(Última visita Septiembre 2014).
- [17] <http://www.bsigroup.es/es/formulario/cambios-iso-9001/>
(Última visita Septiembre 2014).
- [18] <http://www.grupoacms.com/pdf/consultora-iso-14001.pdf>
(Última visita Septiembre 2014).
- [19] <http://www.bsigroup.es/certificacion-y-auditoria/Sistemas-de-gestion/estandares-esquemas/Seguridad-y-Salud-Laboral-OHSAS18001/>
(Última visita Septiembre 2014).
- [20] http://www.metalactual.com/revista/31/materiales_aleaciones.pdf
(Última visita Septiembre 2014).
- [21] <http://www.emmegi.es/Sezione.jsp?idSezione=2685>
(Última visita Septiembre 2014).